

doi: 10.7690/bgzd.2023.05.010

压制退模一体机控制系统

廖芸¹, 杨何¹, 肖漪帆¹, 周明²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;
2. 黑龙江北方工具有限公司 102 分厂, 黑龙江 牡丹江 133205)

摘要: 为满足小批量火工品药柱生产需求, 设计一种能自动识别并连续进行压制退模的控制系统。通过对压制及退模过程中压力特性曲线进行分析, 建立系统控制模型。实际测试结果表明: 该控制系统运行稳定, 能准确识别出压制及退模工序并切换相应控制程序; 在压制模式下能满足设计精度要求。

关键词: 控制系统; 火工品; 压制

中图分类号: TJ450.5 **文献标志码:** A

Pressing and Demoulding Integrated Machine Control System

Liao Yun¹, Yang He¹, Xiao Yifan¹, Zhou Ming²

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd.
of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;
2. No. 102 Factory, Heilongjiang North Tool Co., Ltd., Mudanjiang 133205, China)

Abstract: In order to meet the needs of small batch production of initiating explosive device, a control system was designed, which can automatically identify and continuously carry out pressing and demoulding. Through the analysis of the pressure characteristic curve in the process of pressing and stripping, the control model of the system is established. The actual test results show that the control system runs stably, can accurately identify the pressing and stripping process and switch the corresponding control program, and can meet the design accuracy requirements in the pressing mode.

Keywords: control system; initiating explosive device; pressing

0 引言

武器系统从发射到毁伤整个过程均是从火工品手法作用开始, 几乎所有的弹药都要配备一种或多种火工品。火工品药柱是多数火工品不可或缺的一部分^[1]。火工品药柱成型过程中涉及到压制、退模等关键工序。传统模式下, 同时具备压制、退模功能的设备在压制及退模 2 种模式间的切换需要人工操作。年产量大的火工品药柱可以批量压制后再统一进行退模。受限于模具的高额成本, 压制、退模一般使用到 2 台设备, 一台专用于压制, 一台专用于退模。而对于年产量有限的火工品药柱, 使用一台设备高效实现压制和退模可以极大提升经济效益; 因此, 笔者设计一种可在线自动切换模式的压装退模一体机控制系统。

1 设备原理及控制系统方案

1.1 设备原理

压制退模一体机结构如图 1 所示, 伺服电机与电动缸共同组成伺服电缸, 伺服电缸通过驱动上冲

向下直线运动可以完成压制、退模工序。压力传感器紧固在压药上冲顶端, 前端与压药块活动连接, 压药时压药块将电缸输出的压力传递给药柱。通过压药块压力传感器可采集到压制过程中的实时压力并反馈至主控制器, 由主控制器根据实时压力调节伺服电缸运动形成压力闭环控制。根据伺服电机尾部编码器反馈值, 系统也可以实现位置半闭环控制。

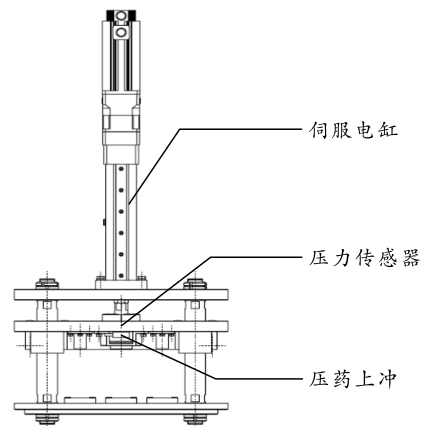


图 1 压制退模一体机结构

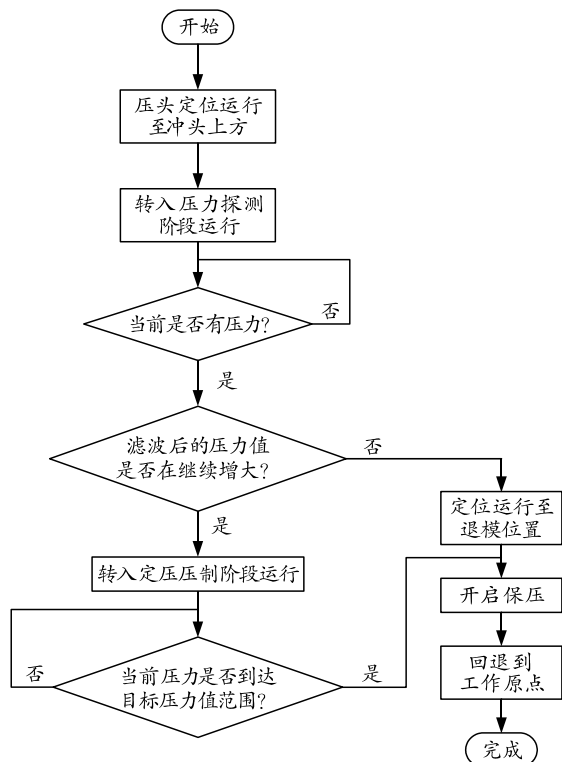
收稿日期: 2023-01-19; 修回日期: 2023-02-18

作者简介: 廖芸(1995—), 男, 四川人, 从事非标设备自动化控制研究。E-mail: sylgly@163.com。

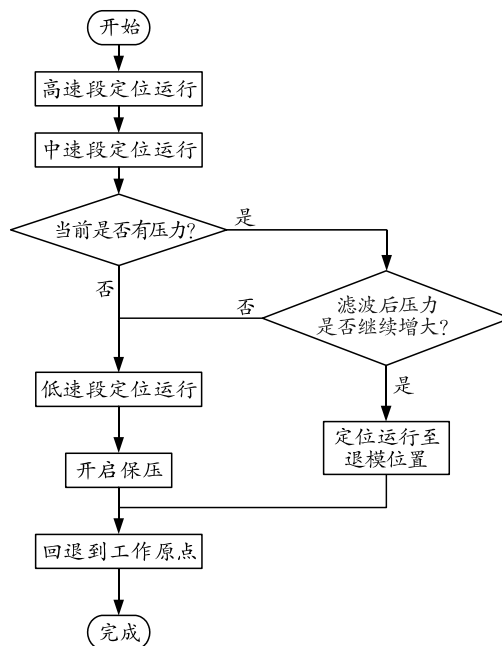
压制工序在抗爆罩内进行。设备初始化后防爆门将升起，模具进出气缸伸出，人工将装药完成的模具放置于模具固定块中，双手按压左右启动按钮启动设备运行。模具进出气缸收回，防爆门关闭，伺服电缸带动上冲开始压制或退模，完成后上冲退回到工作原点，防爆门升起，模具进出气缸伸出完成一次工作循环。

压装退模一体机结构上为防爆电伺服压机，用以实现火工品压制过程中的压力或位置精密控制输出^[2-4]。为使系统能够自动进行压制及退模工序的切换，需识别出压制工序与退模工序的差异。

控制流程如图 2 所示，设备在压制环节中采用恒定压力压制(以下简称定压压制)时，退模工序所需压力远小于压制工序，采用恒定位置压制(以下简称定位压制)时，退模位置与定位压制目标位置可能不同。因此引入了退模位置这一参数，设备运行过程中需能够分辨出压制工序与退模工序，当进行退模时无论压制环节采用的是何种模式都仅进入退模工序的运行程序，以定位运动方式运行至固定的退模位置，完成退模。由于在退模时，药柱与模具内壁的摩擦会由静摩擦转为滑动摩擦；因此，压力传感器采集到的压力值会由大变小，而压制工序中由于药剂的堆积作用，压力值会由小变大，根据这一特征，控制系统能够分辨出压制工序与退模工序。



(a) 定压压制



(b) 定位压制

图 2 控制流程

1.2 控制系统方案设计

控制系统主控制器采用倍福基于 PC 技术的控制器，具备极强的运动控制能力；伺服驱动器采用倍福产品，通过 EtherCat 总线与控制器连接实现控制数据的高效交换。

压力变送器将压力传感器采集到的数据进行滤波后通过模拟量传输至主控制器。

2 压装退模功能实现

2.1 压装模式

设备压装模式可选择定位压和定压压模式。定位压模式下，依靠倍福系统内置伺服控制功能可十分方便地实现半闭环的位置控制。

对于定压压制，由于压力环运行于主控制器中，因此主控制器需进行压力环控制相关计算。

在定压压制模式下，压头首先以位置模式定位运行至冲头上方，然后转为速度模式进行压力探测，当探测到目标压力后转入压力环控制，控制压头输出的压制力到达目标值并进行保压，完成后再以位置模式运行至工作原点。

针对压力环控制，采用经典的比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 控制。PID 系统属于闭环控制系统，闭环控制的特点是按偏差进行控制，所以不论什么原因引起被控变量偏离设定值，只要出现偏差，就会产生控制作用，使偏差减小或消除，达到被控变量与设定值一致的目的^[5]。

控制系统中，以作用于药面压力为被控对象，压力传感器的检测值为反馈。对于设备来说，其无法直接控制作用于药面压力。在系统中，从探测到压力开始，压头位置与作用于药面压力存在正比关系，即压头位置越大，作用于药面压力越大，反之亦然。火工品药剂对象压力控制是典型的非线性控制问题^[6]。在进行压力闭环参数整定时，需在开环系统下测试出压头位置与作用于药面压力的特性曲线。控制系统通过对压头位置的控制可实现对作用于药面压力的控制。

在本系统中，采用增量型 PID 控制算法进行控制，通过计算每个控制周期的压力增量来最终实现目标压力的控制。

2.2 退模功能的引入

退模功能引入系统中后需对控制算法进行优化，由于在 PID 控制中，其启动时由于短时间内系统输出偏差很大，容易造成系统输出直接进入死区，对于退模模式，可能使得压头轴位置发生超调，使退模失败；因此，在原有系统中需引入积分分离，即在被控量与设定值偏差过大的情况下取消积分作用^[7]。

首先将式(1)中的模拟量 PID 进行采样离散得到式(2)位置式算法：

$$U(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d (de(t)/dt)] \quad (1)$$

$$u_k = K_p [e_k + \frac{T}{T_i} \sum_0^k e_k + T_d ((e_k - e_{k-1})/T)] \quad (2)$$

根据增量式算法推导公式：

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (3)$$

将 u_k 及 u_{k-1} 代入式(3)推出增量式算法：

$$\Delta u_k = K_p [(e_k - e_{k-1}) + T e_k / T_i + T_d (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) / T] \quad (4)$$

将上式可写作：

$$\Delta u_k = K_p (e_k - e_{k-1}) + K_i e_k + K_d (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (5)$$

通过在主控制器中执行定时中段程序采集计算出当前压力与目标压力偏差，然后送入 PID 运算程序中计算出压力增量 Δu_k 。由于退模功能的引入，需在采样计算偏差时引入积分分离：

IF (ABS(ek)>r_ekMax) THEN//r_ekMax 为偏差最大值，可通过触摸屏设置

```
i_k:=0;
ELSE
i_k:=1;
```

END_IF;

将积分分离后参数带入增量式 PID 运算中：

```
r_AddPressure:REAL; //定义增量压力
r_AddPressure:=pid.Kp*(pid.ek-pid.ek_1)+i_k*pid.Ki*pid.ek+pid.kd*(pid.ek-2*pid.ek_1+pid.ek_2);
//当 i_k 为 0 时取消积分作用。
```

经 PID 计算后的压力增量与当前传感器测得的实时压力相加可得到控制的目标压力，然后根据压头位置与作用于药面压力的特性曲线算出压头位置。通过主控制器输出压头目标位置，伺服控制器控制伺服电缸执行定位动作，即完成压力环控制。

对于退模工序的辨识，根据 PID 计算环节采样计算出的当前压力与目标压力偏差，比对当前偏差与上次偏差，若减小则说明压力在增大，系统进入压制模式。若增大则说明压力在减小，系统进入退模工序。控制系统参数设置界面如图 3 所示。



图 3 控制系统参数设置界面

由于退模时压力传感器测得的实时压力是先增大后减小的，因此系统还需避开实时压力增大区间以防止误检测。在系统设计时，引入一个退模压力检测延时参数，在该段内，系统不对压力趋势进行判断，该参数可由操作人员设定，针对不同产品该参数存在差异。实际使用过程中若退模压力检测延时设置过长可能导致系统退模失败，直接进入压制模式，造成危险，因此引入退模最大静摩擦力作为模式判断依据之一。选择好产品号后在手动模式下可将系统切换至静摩擦力测试模式，该模式下需设置探测位置、探测速度参数，将需退模产品摆放好后启动测试，压机轴按照设定好的探测速度运行至探测位置，并自动记录该过程中的最大压力作为本产品的静摩擦力值。

当设备运行若在退模压力检测延期内检测到压力大于静摩擦力后开始下降则也进入退模模式。2 种参数的引入保证了设备能正确识别出压装与退模

模式。

3 功能测试

调试过程中发现压制模式下可能发生因压力传感器输出值波动造成值压力检测值减小，从而造成工序误判的情况；因此，除在压力传感器变送器端设置滤波参数外，控制器程序中还需编写滤波程序，为保证滤波效果，将滤波程序作为高优先级独立程序进行编写并在控制器中设置程序执行循环时间为 1 ms。

如表 1 所示，准备 3 个模具及相应火工品药剂进行压装退模测试，选择压装模式为定压压制，设定目标压力为 1 000 N。

表 1 压装退模测试

序号	工序	设备运行模式	压装压力/N
1	压装	压装	1 002.1
2	压装	压装	1 002.3
3	压装	压装	999.6
4	退模	退模	
5	退模	退模	
6	退模	退模	
7	压装	压装	1 000.8
8	压装	压装	1 001.3
9	压装	压装	1 002.0
10	退模	退模	
11	退模	退模	
12	退模	退模	

由测试结果可看出，系统能够正确辨识压装退模工序，压装模式下压力精度能够满足设计的 $\pm 5\%$ 精度指标。对于定位压制模式，由于设备定位运行采用半闭环控制；因此，定位误差仅与丝杠齿轮间隙有关，经百分表检验设备重复定位精度为 ± 0.02 mm，满足 ± 0.1 mm 设计精度要求。

统计上述压装测试中的整个压制流程时间，保压时间设置为 1 s，结果如表 2 所示。压制流程平均耗时 6.6 s。

表 2 压装时间测试

序号	运行时间/s	压装压力/N	序号	运行时间/s	压装压力/N
1	6.5	1 002.1	4	6.6	1 000.8
2	6.8	1 002.3	5	6.5	1 001.3
3	6.7	999.6	6	6.6	1 002.0

在同类压机上以同样产品进行压制，保压时间为 1 s 时压制十发运行时间平均值为 6.3 s。装压药一体机压制耗时增加是由于为保证系统能正确识别压装与退模模式需将探测速度设置为较小值，造成探测运行时间加长。

4 结束语

压装退模一体机在火工品生产中的使用效果表明：相比原有技术，该一体机能够连续实现火工品药柱的高精度压制及退模功能，压制节拍稍有下降，能高效快速实现压装、退模功能切换，并满足设计精度要求。

参考文献：

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京：国防工业出版社，2014：7.
- [2] 赵建抒，刘辉. 用于火工品压制的伺服压力机控制系统[J]. 兵工自动化，2016，35(6)：16-20.
- [3] 杨何，黄盛，陈海峰，等. 基于火工品装药机的倒余药机构控制系统分析[J]. 兵工自动化，2021，40(8)：88-91.
- [4] 何正红，汪涵，王新科，等. 推进剂复合加工控制系统[J]. 兵工自动化，2021，40(9)：83-88.
- [5] 俞金寿，孙自强. 过程控制系统[M]. 北京：机械工业出版社，2018：6-7.
- [6] 赵凯，朱全松. 高效高精度火工品压药控制系统[J]. 机械与电子，2015(11)：29-31.
- [7] TaiBai-let. 各种 PID 算法—用 C 语言去实现[EB/OL]. http://blog.csdn.net/Nirvana_Tai/article/details/105409311. (2020-04-09)[2022-02-15].