

doi: 10.7690/bgzd.2021.08.020

## 基于火工品装药机的倒余药机构控制系统分析

杨 何<sup>1</sup>, 黄 盛<sup>2</sup>, 陈海峰<sup>2</sup>, 宋育生<sup>2</sup>, 许杰淋<sup>1</sup>, 刘金雨<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 浙江华东光电仪器有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:** 为解决火工品制造工艺中的实际问题, 设计一套伺服电机控制系统。对装药设备的结构模型进行分析, 基于 PROFINET 总线, 构建 PLC-驱动器-伺服电机的控制模型, 对控制系统的具体实现过程进行阐述, 运用模糊控制方法确定模糊控制规则。分析结果表明: 该系统能平稳、快速地实现装药机的自动上药和倒余药, 消除人工操作的安全隐患, 提升生产线的本质安全度。

**关键词:** 火工品; 伺服电机; PROFINET; 模糊控制

**中图分类号:** TJ410.5 **文献标志码:** A

## Analysis on Control System of Dumping Residual Powder Mechanism Based on Initiating Explosive Device Charging Machine

Yang He<sup>1</sup>, Huang Sheng<sup>2</sup>, Chen Haifeng<sup>2</sup>, Song Yusheng<sup>2</sup>, Xu Jieli<sup>1</sup>, Liu Jinyu<sup>1</sup>

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd.

of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. Zhejiang Huadong Optic-electronic instrument Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** In order to solve the practical problems of initiating explosive device manufacturing process, a servo motor control system was designed. Through analyzing the structure model of charging equipment, the PLC-driver-servo motor control system was designed by the PROFINET bus. Then, the specific implementation process of the control system was introduced, and the fuzzy control rules were determined according to the fuzzy control method. The analysis results show that the system can realize automatic charging and dumping residual powder of the charging machine smoothly and quickly, it eliminates the hidden danger of manual operation, and improves the intrinsic safety of the production line.

**Keywords:** initiating explosive device; servo motor; PROFINET; fuzzy control

### 0 引言

火工品指装有一定炸药、可用预定的刺激量激发以爆炸或燃烧产生的效应, 来完成规定功能的元件或小型装置<sup>[1-2]</sup>。作为武器弹药的首发部件和始发能源, 火工品为陆、海、空三军和火箭军等高新武器装备提供火工技术支撑, 是整个国防工业的基础专业和核心基础技术之一<sup>[3]</sup>。目前, 国内正在大力发展自动化、安全化、柔性化的火工品装药装配生产线<sup>[4-6]</sup>。为保障生产安全, 对产线上的装药机、压药机等专机设备大都运用钢板防护实现人机隔离。生产模具通过防爆门进出防护间, 在防爆门关闭时才进行装压药, 从而保证装压药时生产人员的本质安全。装药机的上药及倒余药环节仍由生产人员参与完成, 特别是针刺药、起爆药感度较大, 如何保证此环节的安全性, 是当前自动化生产线需要解决的问题。

传统火工品装药机上药及倒余药多采用手工操作或气缸控制。手工操作未实现人机隔离, 存在较大的安全隐患, 也不符合生产无人化、自动化的发展趋势; 气缸控制时运动速度一致性不能保证, 存在憋气导致的速度突变现象, 仍存在缺陷。

笔者针对火工品装药机安全保障的需求, 根据上药和倒余药的实际情况, 结合模糊控制方法, 基于 PROFINET 总线研究搭建了一套用于倒余药机构的伺服电机控制系统, 实现了火工品装药机余药清理的自动化、安全化。

### 1 控制模型

#### 1.1 上药控制

上药时, 药剂需由药杯倒入装药器, 存在由撞击、摩擦引起燃烧、爆燃、爆炸的隐患, 有必要采用自动上药机构。如图 1 所示, 上药机构主要由水平旋转气缸、翻转气缸、夹紧气缸构成。其中夹紧

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-26

作者简介: 杨 何(1996—), 男, 贵州人, 从事火工品装药装配设备研究。E-mail: yhswai@163.com。

气缸采用双电控电磁阀控制，防止出现上药过程中突然断电致使药杯跌落而导致安全事故。上药时，生产人员把装有药剂的药杯置于夹紧气缸处，然后退出防爆间并启动上药程序，PLC发出控制指令，夹紧气缸夹紧，水平旋转气缸将药杯旋转至装药器上方，翻转气缸翻转实现加药，完成后气缸依次复位。

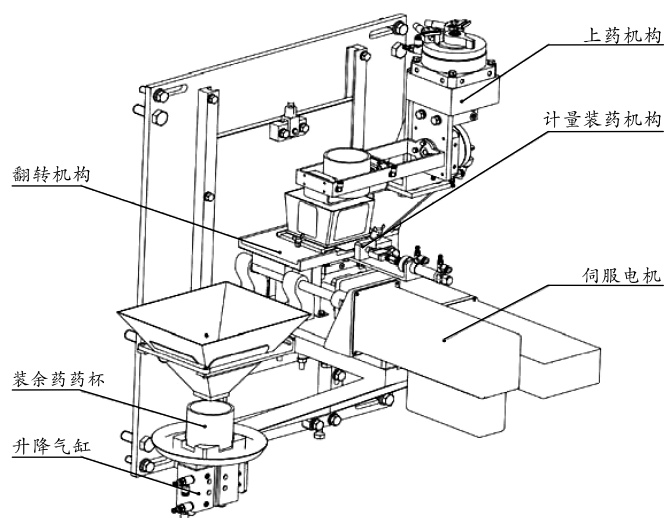


图 1 火工品装药设备结构说明

## 1.2 倒余药控制

倒余药时，先将药杯置于接药漏斗下方的升降气缸上，触发倒余药程序，由 PLC 发出控制指令，升降气缸上升，然后通过伺服驱动器控制伺服电机运动，再由减速器将运动传递至翻转机构上，完成倒余药动作。整个倒药过程采用闭环的位置模式控制，驱动器实时反馈电机运动参数，PLC 实时跟踪运动参数并在遇到异常时及时报警停机。整个控制过程稳定精确、响应速度快、安全性高、抗干扰强。倒药完成后，升降气缸下降，翻转机构需翻转回来，将计量装药机构一直压在水平台面上。此过程采用转矩模式，通过对转矩和速度进行模糊控制来实现翻转。此后的装药过程，整个转矩控制一直有效，可在保证装药质量的同时确保装药机构的稳定，从而保证装药精度。

上药机构控制系统的设计搭建较易实现，笔者主要对倒余药控制系统的搭建进行详细阐述。

## 2 倒余药控制系统实现基础

控制系统具备手动运行和自动运行 2 种状态，手动主要为电机的点动控制，手动控制信号由手操盒上的开关或触摸屏上定义的虚拟按键进行输入；自动运行则实现余药清理的自动化、安全化。

## 2.1 硬件基础

可编程逻辑控制器采用西门子系列 PLC；伺服驱动器选用如图 2 所示的国产英威腾 SV-DA200 系列绝对式驱动器；电机选用如图 3 所示的江苏惠斯通的防爆伺服电机，该电机结构紧凑、可靠性高、噪声低、质量轻、安装维护方便。

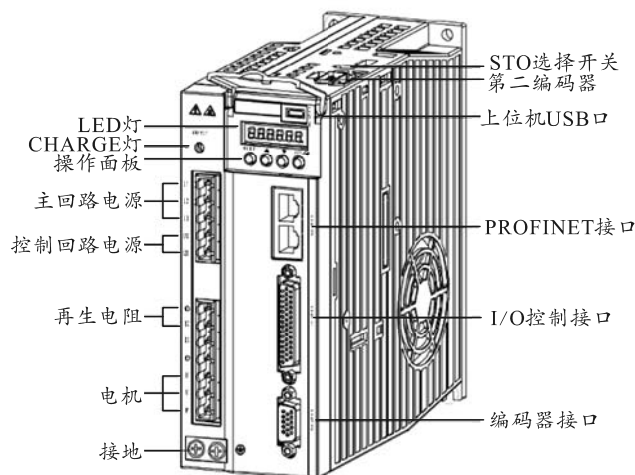


图 2 英威腾 SV-DA200 系列绝对式驱动器

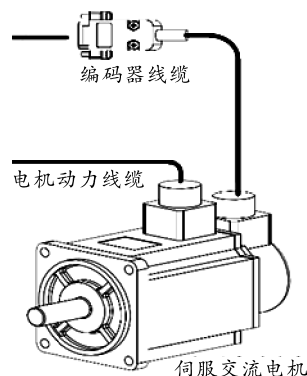


图 3 惠斯通防爆伺服电机

## 2.2 软件配置

伺服电机与伺服驱动器通过编码器线进行数据交换，伺服驱动器与 PLC 通过基于 PROFINET 总线的 DP-V0-1 通信协议进行数据交换。PROFINET 采用标准“TCP/IP+以太网”作为连接介质，以及标准 TCP/IP 协议加上应用层的 RPC/DCOM 来完成节点间的通信和网络寻址，可同时挂载传统 PROFIBUS 系统和新型的智能现场设备<sup>[7-8]</sup>。

驱动器组态时，需通过一个设备描述文件-GSD 文件将伺服驱动器（从站）的设备特性描述给 PLC（主站），然后通过 IP 地址来建立 PLC 与伺服驱动器之间的通信。DP-V0-1 周期传输报文采用 32 Byte 固定帧长度的传输方式，0~7 Byte 为 PKW 报

文，用于传输非周期性数据，主要进行参数的读写操作，参数的设置也可直接通过 LED 面板或 ServoPlorer 软件对驱动器进行设置；8~31 Byte 为 PZD 报文，用于传输周期性数据，如控制字、位置指令、速度指令、转矩指令或者状态字、位置反馈、速度反馈、转矩反馈等，是运动控制的主要数据交换方式。PZD 报文共 12 个字，按 Big-Endian(先高字节，后低字节)格式传输，其主要配置如表 1。

表 1 PZD 报文配置

数据	PZD											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
下行	CW	速度指令	点位触发	第一目标速度	第一段位置	总线转矩	内部速度限制					
上行	SW	速度反馈	故障代码	反馈脉冲	滞留脉冲	电机转矩						保留

CW 控制字能实现伺服使能、HOME 触发、控制模式切换等功能控制，SW 则实时反馈伺服准备输出、定位完成、回零完成等电机控制状态。PZD 中第 1 个字已做配置，后几个控制字可按需更改。该系统中，0 和 1 为默认配置参数。对于下行控制字：将 PZD 参数 1 配置为点位触发(P5.20)，PZD 参数 2 配置为第一目标速度(P5.22)，PZD 参数 3 配置为第一段位置(PTP0.03)，PZD 参数 4 配置为总线转矩(P4.14)，PZD 参数 5 配置为内部速度限制(转矩模式下最大速度 P0.46)。

对于上行控制字：将 PZD 参数 1 配置为故障代码(R0.99)，PZD 参数 2 配置为反馈脉冲(R0.02)，PZD 参数 3 配置为滞留脉冲(R0.04)，由 PZD 参数 2、3 可计算得到电机位置，PZD 参数 4 配置为电机转矩(转 R2.22)，PZD 参数 5 暂时保留。

### 3 倒余药运动控制的具体实现

倒余药时，应保证运动过程平稳无冲击，加之对翻转角度有一定要求，选用速度恒定的位置模式。运动控制开始，首先需在驱动器内部预设好 1 个点位：通过 PZD 报文由 PLC 将第一目标速度、第一段位置、内部速度限制等参数的值写入驱动器中。该点位还包含加速度等信息，这些信息通过 ServoPlorer 软件直接设置。然后开启伺服使能，通过 PZD 报文转至位置模式并进行点位触发(将点位触发的值由-1 变为 1)，电机即开始带动翻转机构翻转，采用闭环的位置模式控制翻转过程，对驱动器反馈的转矩、速度、位置进行实时跟踪监控，同时程序基于设定速度实时计算理论位置并将其与运动过程中的实际位置比较。当实际位置相对理论位置

超差过大、转矩过大或速度失速时，及时报警停机，保证倒药过程的安全性。

翻转机构回位时，通过 PZD 报文将电机控制模式转变为转矩模式，然后通过对转矩和最大速度的实时控制，平稳、快速地将机构翻转回去并下压在水平台面上。翻转初始，装药器内已没有药剂，翻转机构回位速度可适当加快，当翻转快至水平时，考虑台面上可能有浮药存在，此时应以较慢的速度下压，保证平稳无冲击。

回位时，通过电机内部的速度环、电流环进行内环控制；以转动位置与速度作外环控制，需控制翻转机构以先快后慢的速度曲线平稳回位，该控制方法参考模糊自适应控制器进行控制<sup>[9-10]</sup>。

翻转至水平时，PLC 读取驱动器反馈的当前位置并加以记录。多次记录后，剔除异常数据计算整个机构返回终点位置的一般值，每次运动，程序都将对这个一般值进行学习。

选择控制系统的输入为位置误差  $e$  和转速  $v$ ，位置误差为电机反馈位置与终点位置通过对比所得，根据实际机构可确定位置误差为  $0\sim 150^\circ$ ，电机转速为电机编码器反馈所得。控制系统的输出为转矩模式的电机控制参数：总线转矩  $N$  与内部速度限制  $v_L$ 。转矩  $N$  与速限  $v_L$  将通过电机内部电流环、速度环限定电机转速，从而改变控制系统输入量。为保证安全，电机参数与翻转机构的模型结构转矩限制在 20%以内，转速限制在 30 r/min 以内。控制系统工作时，首先通过比例因子将位置误差和转速进行转换处理，将位置误差和转速映射到  $0\sim 6$ ，得到系统输入  $E_1$ 、 $E_2$ ；然后通过模糊规则推理出  $U_1$  ( $0\sim 4$ ) 与  $U_2$  ( $0\sim 6$ )，再乘以相应的量化因子  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  即得到输出总线转矩  $N$  与内部速度限制  $v_L$ ；输出得到的控制参数通过 PZD 报文传输至电机驱动器即可对翻转机构运动进行实时控制。控制系统结构如图 4 所示。

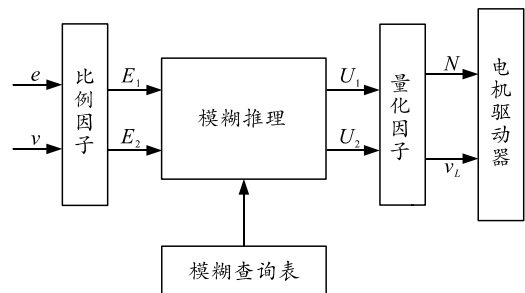


图 4 模糊控制系统结构

为了获得好的控制结果，需设定以下模糊推理

规则：翻转初始，位置误差  $e$  最大、转速  $v$  为 0，为了降低翻转运动时间，初始总线转矩  $N$  与速限  $v_L$  取最大值 4 与 6；往后位置误差变小，转速变大，总线转矩与速限需逐渐降低；当翻转快至水平时，为防止翻转机构冲击浮药导致危险，取较小的总线转矩与速限。根据以上分析可总结得到自调整规则如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则查询

$v$	$e$						
	6	5	4	3	2	1	0
0	46	45	44	33	32	31	11
1	46	45	44	33	32	21	11
2	46	45	44	33	22	21	00
3	46	45	44	23	22	00	00
4	46	45	34	23	00	00	00
5	46	35	34	00	00	00	00
6	36	35	00	00	00	00	00

#### 4 结论

敏感药剂可在较小的外界刺激能量作用下激发，产生燃烧或爆炸。为了安全高效地生产敏感药剂型火工品，笔者对敏感药剂的余药清理进行分析，设计一套用于装药机倒余药机构的伺服电机控制系统，实现了火工品装药机倒余药的自动化、安全化，可为火工品产线的自动化作业提供参考。

\*\*\*\*\*

(上接第 87 页)

#### 4 结论

笔者首先对系统的层次、模块划分方法进行了说明。在此基础上，提出了相关性矩阵合并算法。该算法可由低层次模块的故障-测试相关性矩阵依次合并，最后生成高层次模块的故障-测试相关性矩阵。以某导航系统为例进行了实例验证。结果表明：该测试性模型构建技术具有可行性，可以通过算法来代替部分需要人工完成的工作，与传统的测试性建模方法相比能够降低系统级的测试性建模难度。

#### 参考文献

[1] 王康. 基于 Bayesian 网络的导弹装备测试性验证技术研究[D]. 烟台: 海军航空大学, 2019.  
 [2] 史贤俊, 王康, 肖支才, 等. 面向复杂系统的三维 Bayes 网络测试性验证模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1303-1313.  
 [3] 肖支才, 王康, 赵学远, 等. 导弹装备测试性数据相关性分析研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(2):

#### 参考文献:

[1] 汪佩兰, 李桂茗. 火工与烟火技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 162-170.  
 [2] 齐铭, 肖勇, 黄求安, 等. 炸药共晶工程自动化的几种方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 66-67.  
 [3] 李建, 吴玲, 张伟, 等. 火工品球形装药工艺与技术研究[J]. 国防制造技术, 2016(4): 16-19.  
 [4] 李全俊, 张博, 史慧芳, 等. 发射药自动混同设备及工艺技术[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 73-77.  
 [5] 张弦弦, 朱全松. 基于柔性制造理论火工品小群模自动装配生产线的实现[J]. 机械制造与自动化, 2015, 34(3): 168-171.  
 [6] 石义官, 李全俊, 刘锡朋, 等. 射孔弹自动装药装配生产线[J]. 兵工自动化, 2020, 39(4): 94-96.  
 [7] 王忠, 陈明锐. 基于 PROFINET 工业以太网的柔性制造系统的研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 89-91.  
 [8] 赵建抒, 史慧芳, 关胤. 爆炸逻辑网络自动精密挤注装药工艺装备技术[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 82-83.  
 [9] 黄良沛, 邹东升, 陈磊, 等. 一种模糊 PID 控制器的设计与仿真[J]. 机械工程师, 2018, 329(11): 7-9, 13.  
 [10] 杜木伟, 陈保林, 漆帮林. 发射药螺旋分料装置的设计与实验研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(11): 78-80.  
 \*\*\*\*\*  
 223-227.  
 [4] 杨鹏. 基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
 [5] 郑应荣. 系统级层次化测试性建模与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
 [6] 魏清新, 王坤明, 孙萍. 基于多信号流图模型的导弹系统级故障诊断技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(3): 109-111.  
 [7] 翟禹尧, 史贤俊, 吕佳朋. 基于广义随机 Petri 网的导弹系统测试性建模与指标评估方法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(10): 2070-2079.  
 [8] 翟禹尧, 史贤俊, 秦玉峰, 等. 基于层次广义随机 Petri 网的测试性建模新方法[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 161-170.  
 [9] 廖恒. 基于多信号模型的系统可测性设计分析研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
 [10] 邱静. 装备测试性建模与设计技术[G]. 北京: 科学出版社, 2012.  
 [11] 郑应荣. 系统级层次化测试性建模与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.