

doi: 10.7690/bgzd.2020.06.019

基于 PROFINET 总线的高精度安全型火工品压药控制系统

廖 芸, 周丽娟, 胡 阳

(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)

摘要: 为解决传统火工品压药控制技术难以实时限制压药压力的问题, 设计一种基于 PROFINET 总线的伺服压药控制系统, 通过 PROFINET 总线将压机伺服电机力矩实时反馈回控制系统。控制系统在压药过程中通过伺服驱动器对伺服电机输出的力矩进行实时限制控制, 并对伺服驱动器反馈回来的力矩和输出力矩限制值进行对比, 判断是否触发力矩超限报警并停止压药。结果表明, 该系统能极大提升压药精度和压药过程的安全性。

关键词: PROFINET 总线; 压药控制; 伺服电机

中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

High Precision and High Safety Explosive Device Powder Pressing Control System Based on PROFINET Bus

Liao Yun, Zhou Lijuan, Hu Yang

(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In view of the fact that the traditional powder pressure control technology is difficult to control the pressure in real time, a servo pressure control system based on PROFINET bus is designed, and the torque of the servo motor is fed back to the control system through PROFINET bus in real time. In the process of pressing charge, the control system controls the large torque of the servo motor in real time through the servo driver, and compares the torque feed back by the servo driver with the limit value of torque to judge whether the trigger torque exceeds the limit alarm and stops the powder pressing. The results show that the system can greatly improve the accuracy and safety of the pressing process.

Keywords: PROFINET bus; pressure control; servo motor

0 引言

火工品作为武器系统的点火起爆元件, 具有药剂敏感度高、生产危险性大的特点^[1]。为了保证弹药武器的成功点火和起爆, 要求火工品药柱生产时必须保证将产品尺寸控制在较小误差范围内。对于药剂感度高的火工品药柱, 在压药过程中需实时监测控制压药压力, 防止发生爆燃事故^[2-3]。传统方式的压药工艺通常采用气液增力缸通过控制比例减压阀输出压缩空气, 由气液增力缸, 通过液压系统转换为冲击力作用于装有药剂的火工品上^[4]。采用压力传感器采集压力数据反馈到控制系统中。由于输入空气压力变化会对气液增力缸输出压力造成较大影响, 且压力传感器的压力数据经变送器传输至控制系统中时会产生一定滞后性, 不能实时体现压力的变化; 因此, 该方法只适用于对精度要求不高且药剂感度低的火工品压药。为提升火工品压药精度和压制过程安全性, 笔者以某种药剂感度高的火工品药柱为例, 设计一种基于 PROFINET 总线(简称

PN 总线)的伺服压药控制系统。

1 控制系统设计

1.1 控制系统总体设计

压药系统工作时, 由 PLC 控制伺服驱动器驱动伺服电机运动, 并通过电缸将电机的旋转运动转为线性运动, 驱动冲压杆向下运动完成压药工作。压药控制系统采用西门子 PLC 作为控制器, 英威腾伺服驱动器通过 PN 总线与控制器连接, 接收控制器的控制指令, 并反馈电机的状态值。由于某种火工品药柱要求高度尺寸精度需达到 ± 0.1 mm。通过采用带 17 位多圈绝对值编码器伺服电机的高精度伺服电缸, 控制伺服电缸进行定位运动可以实现高精度压药。

1.2 伺服电缸位置控制原理

电缸丝杆由伺服电机带动运行, 通过控制伺服电机定位运动可以实现电缸的位置控制。伺服电机作为执行元件采用半闭环位置控制。控制系统如图

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-24

作者简介: 廖 芸(1995—), 男, 四川人, 学士, 助理工程师, 从事电气自动化控制研究。E-mail: sylgly@163.com。

1 所示。伺服电机的半闭环位置控制由伺服驱动器控制实现，半闭环位置控制包括电流环、速度环和位置环三闭环控制。伺服控制器通过编码器采集电机的位置和速度信息，通过电流传感器采集电机电流信息。位置环的给定信号为伺服驱动器根据 PLC 的指令规划的脉冲信号，脉冲的数量决定电机运动的距离，脉冲的频率决定电机的转速。根据自动控制原理，将系统的被调节量作为反馈量引入系统，与给定量进行比较，用比较后的偏差值对系统进行控制，可以有效抑制甚至消除扰动造成的影响，而维持被调节量很少变化或不变^[5]。编码器采集到的电机位置信息作为位置环的反馈信号，当位置环的给定信号与反馈信号出现偏差时，位置控制器才进行调节，使电机运动位置与位置给定趋于一致，从而实现定位控制。

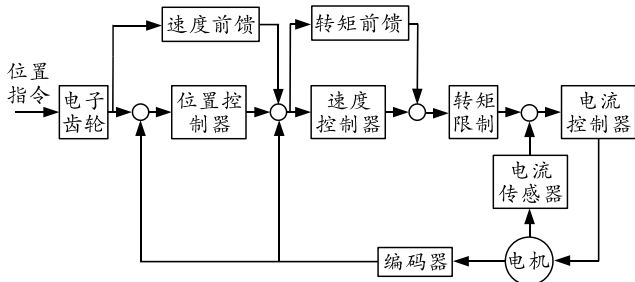


图 1 半闭环位置控制系统

速度环的给定信号为位置控制器的输出，反馈信号为编码器采集到的速度信息。为了提升系统对扰动的抗干扰性，在速度环和电流环中引入前馈调节。前馈调节能够在干扰量发生变化，但被调节量变化还未反馈回来时，对被调节量进行粗调，在反馈控制作用前及时克服干扰。

电流环的给定为速度控制器的输出，该给定量受转矩限制值限定，伺服驱动器将给定量同转矩限制值进行比较，如果给定量超过设定的转矩限制值，则对输出转矩进行限制。电机电流通过电流传感器反馈到伺服驱动器中，作为电流环反馈。为提升电流环的抗干扰能力，引入了转矩前馈。

控制系统中，伺服驱动器采用内部点位控制模式，是在驱动器中预先设置好一个或多个点位，每个点位包含位置、加速度和速度等信息。在控制伺服电缸时，PLC 通过 PN 总线发送所需激活的点位，伺服驱动器调用相关位置速度信息，经过半闭环位置控制，使伺服电缸运动到指定位置。

2 PN 总线介绍和报文配置

PROFINET 是将成熟的 PROFIBUS 现场总线技

术的数据交换技术和基于工业以太网的通信技术整合到一起的开放式工业以太网标准^[6]。笔者设计的控制系统使用的 PN 总线通信协议中，伺服驱动器实时控制使用循环数据进行指令设置及状态监控，非循环通信功能用于循环数据传输中的参数化、诊断和故障处理等^[7]。周期传输报文采用 32 Byte 固定帧长度的传输方式，其中 0~7 Byte 为 PKW 报文格式，8~31 Byte 为 PZD 报文格式。PN 总线报文帧结构如图 2 所示。

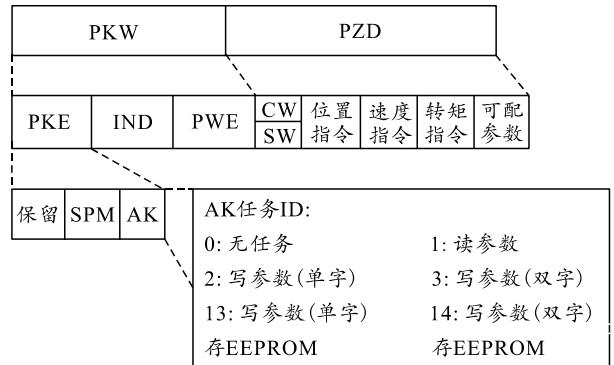


图 2 PN 总线报文帧结构

在控制系统中，由于 CPU 和扩展 I/O 模块占用了前段 I/O 地址；因此，将伺服驱动器报文地址配置为 IB100~IB131 和 QB100~QB131。PKW 报文中 0~1 Byte 为 PKE 报文，用于分配 PKW 报文任务，如从驱动器读取数据，向驱动器写入数据等，2~3 Byte 为需要读取或写入的参数地址，4~7 Byte 为需要读取或写入的参数值。PZD 报文包括常用的控制字、状态字指令(如伺服使能、伺服使能成功等功能)以及位置、速度、转矩和 3 个可配置的参数。PZD 中的参数设置和读取较为简单，只需在 PLC 程序中对参数对应的地址进行读写操作即可。在伺服驱动器的内部点位控制模式下，首先需要配置第 00 段控制字(PTP0.00)，指定第 00 段目标速度、加速度等所对应的 P 参数地址。然后将驱动器端的 PZD 设置参数 1(P4.80)配置为第 00 段目标速度(P5.21)，将 PZD 设置参数 2(P4.81)配置为第 00 段位置(PTP0.01)，为实现实时力矩限制，将 PZD 设置参数 3(P4.82)配置为最大力矩限制值(P0.10)。将 PZD 反馈参数 1 配置成当前转矩反馈(R2.22)。配置完成后，通过对 PZD 设置参数的写入操作能够更改对应配置参数的值，读取 PZD 反馈参数即能获取所配置参数的值。

3 定位控制及压药流程的实现

对伺服电缸进行定位运动控制时，在开启伺服

使能的情况下，先将目标位置和运动速度通过 PZD 写入伺服驱动器，然后通过 PKW 数据发送点位触发信号。

rPosition:=Motor.rPosition;

rVelocity:=Motor.rVelocity;// rPosition 和 rVelocity 为配置的 PZD 参数

PKW 主要用于传输非周期性信号，PKW 写入参数时，先将需要写入的参数 IND 地址赋值给 ID103，然后将所需配置参数值分成 PWE 高位和 PWE 低位，写入 ID105 和 ID107 中。赋值参数后，需要开启 PKW 报文写参数任务，进行参数写入，之后还需开启 PKW 读参数任务，确认参数是否成功写入到驱动器中。通过 PKW 写参数流程如图 3 所示。点位触发信号参数为无符号整型参数，只需进行 PWE 低位的写入操作。通过 PKW 将点位触发信号发送给伺服驱动器后，便能够激活电机带动电缸丝杆按照第 00 段所设置的位置和速度进行定位运动。电机到达预定点位后会通过 PZD 状态字 I109.6 反馈回定位完成的信号。PLC 接收到定位完成信号后，便表示伺服电缸的定位运动完成。

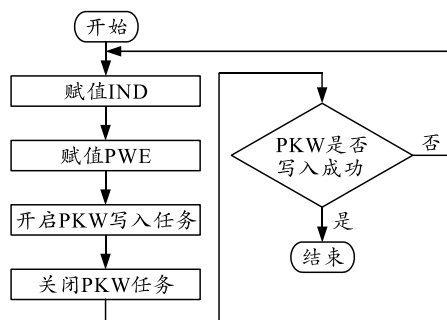


图 3 PKW 写参数流程

自动压药时，需通过设置转矩限制对伺服电机输出转矩进行限制。限制值需大于正常压制药柱时的转矩值。压药过程中如果药量过多，驱动器对输出转矩进行限制，电机实际位置值无法跟随设定值变化，触发转矩超限保护，设备停止运行，系统发出报警信号。由人工在手动模式下控制上冲退回原位。

由于某火工品药剂一致性较好，因此，采用计量板定容拉药方式能够保证加药的质量精度。为保证药柱尺寸精度和药柱生产节拍，将压药下压过程分为快速压药段、中速压药段和低速压药段 3 段。通过内部点位控制方式，控制伺服电缸定位运动。在系统调试过程中发现，冲压杆在高速运动和中速运动切换过程中存在明显过冲现象，经分析认为力矩限制造成了电机加减速性能下降，减速不及时造成过冲。因此，在控制算法中将力矩限制的位置设

为第二段中速运动起始位置+1 mm，此时冲压杆开始与药面接触，必须进行压药力矩限制。在高速和中速运动中，由于冲压杆未与药面发生接触，为防止过冲，不进行力矩限制。压药控制流程如图 4 所示。

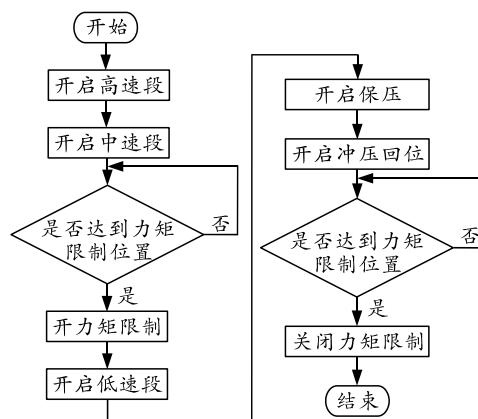


图 4 压药控制流程

4 调试实验

将系统切换到手动控制模式，控制压药电缸反复定位运行，利用百分表检验，上冲杆重复定位精度为±0.03 mm。在自动运行模式下，加入替代料进行压制，利用游标卡尺检验压制的药柱。由表 1 检验结果可知：药柱高度精度为±0.05 mm，满足药柱尺寸要求。

表 1 药柱高度偏差数据

药柱编号	高度尺寸偏差/mm	是否合格
1	+0.01	合格
2	+0.02	合格
3	+0.01	合格
4	0	合格
5	+0.01	合格
6	+0.05	合格
7	-0.01	合格
8	+0.03	合格
9	+0.01	合格
10	0	合格

在自动模式下，设置转矩限制值为 20%，加入一致性差的药剂(导致定容拉药时所加药剂质量变化值大)，开启设备，压药柱 100 发。监控设备运行，在设备发出转矩超限报警时，取出药柱进行称量，所有触发报警的药柱质量全部不合格。药柱压制后取出剩余药柱称量，所有未触发报警的药柱质量全部合格。在自动模式下，设置转矩限制值为 20%，调大计量板计量孔，使所加药剂超出合格药剂质量 0.15 g，启动设备自动压药 20 发。压药过程中，每发超重药柱都能触发转矩超限报警。

程对比,该方法在具体操作上还不够精细,仍存在较大的优化空间,特别是对试验条件中的敏感因子确定与控制、自主性能关键影响因素分析与实战环境构建、作战试验定量评估方法、试验数据有效样本量选取等方面还需深入研究。

参考文献:

[1] 美国国家科学院国家研究理事会. 军用无人地面车辆技术的发展[M]. 付梦印, 王美玲, 译. 北京: 国防工业出版社, 2009: 1.

[2] 刘克俭. 美国未来作战系统[M]. 北京: 解放军出版社, 2009: 38-52.

[3] DARPA. DARPA Grand Challenge[EB/OL]. [2014-09-11]. http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge.

[4] KROTKOV E, FISH S. The DARPA PerceptOR evaluation experiments[J]. Auto Robot, 2007, 22(1): 19-35.

[5] LESEMANN M. Testing and evaluation methods for ICT-based safety systems[EB/OL]. [2008-01-01].

(上接第 78 页)

[11] 郑万里, 佃松宜. Buck 变换器的变积分离散时间建模[J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 287-291.

[12] SHORTT D J, LEE F C. Improved switching converter model using averaging and discrete techniques[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(2): 190-202.

[13] LIN C, QIU B, CHEN Q. Comparison of current input equivalent circuit models of electrical vehicle battery[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 76-81.

[14] KHARE N, GOVIL R. Modeling automotive battery diagnostics[J]. Power Electronics Technology, 2008, 34(3): 36-41.

(上接第 81 页)

5 结论

笔者以提升火工品压药生产安全性和压药精度为目标,对传统使用气液增压药控制方式进行改进,通过采用带 PN 总线功能的伺服驱动系统,实现实时监控和限制压药力矩。实验结果表明,使用基于 PN 总线技术的伺服压药控制系统能够极大提升压药精度和压药过程的安全性。该技术可广泛应用在各类药剂感度较高的火工品药柱压制生产上。

参考文献:

[1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社,

<http://www.evaluate-project.eu/pdf/evaluate-080402-d11-v14-final.pdf>.

[6] ADAM J, ELENA M. Test arenas and performance metrics for urban search and rescue robots[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, NV: IEEE, 2003: 3396-3403.

[7] 李胜编译. 美国陆军无人作战系统试验规程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017: 174-271.

[8] 熊光明, 高利, 吴绍斌, 等. 无人驾驶车辆智能行为及其测试与评价[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 188-198.

[9] 史辉, 刘向前. 地面无人平台在典型战场环境中的自主机动性能评价研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(增 1): 17-23.

[10] 王凯. 武器装备作战系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 66-72.

[11] 苏治宝, 王宏明, 杨甜甜, 等. 地面无人作战平台性能评价指标体系[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 562-565.

[15] TANI A, CAMARA M B, DAKYO B, et al. DC/DC and DC/AC converters control for hybrid electric vehicles energy management-ultracapacitors and fuel cell[J]. Industrial Informatics, 2013, 9(2): 686-696.

[16] 高建平, 葛坚, 赵金宝, 等. 复合电源系统功率分配策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 17-24.

[17] 陈方. 基于超级电容的双向 DC/DC 变换器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[18] 余泉. 基于混杂自动机模型的 DC/DC 变换器的控制方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[19] 段翔兮, 佃松宜, 郑万里. 基于离散演化映射的 DC/DC 变换器混合逻辑动态建模[J]. 电测与仪表, 2017, 54(3): 7-13.

[2] 夏建才, 刘丽梅. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 32-36.

[3] 徐文文, 毕雪芹, 陈超波. 基于 Volterra 级数对火工品起爆过程的辨识[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 62-65.

[4] 樊学良, 赵凤歧, 向方容, 等. 气液增压技术在火工品生产中的应用[J]. 四川兵工学报, 2006, 6(5): 45-47.

[5] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 25-29.

[6] 刘国海. 现场总线 PROFINET[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 13-15.

[7] 上海英威腾工业技术有限公司. 英威腾技术指南[Z]. 上海: 上海英威腾工业技术有限公司, 2018.