

doi: 10.7690/bgzh.2025.06.017

基于 PLC 的火工药剂高精度称量系统设计

金翰林¹, 鞠一非¹, 廖 芸¹, 余新继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. 河南北方红阳机电有限公司, 河南 南阳 474679)

摘要: 为满足高精度和高效率的火工药剂称量需要, 设计一套基于可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 的火工药剂高精度称量系统。采用定容称量与可控振动称量相结合的方式, 先用定容式计量板添加大剂量药剂, 再用 PID 算法控制直线振动机构以一定的频率振动, 带动上方容器内的药剂沿料道进行高精度小剂量添加, 判断药剂重量, 剔除不合格产品。采用多种火工药剂进行测试, 结果表明: 该称量系统测量精度小于 1 mg, 称量效率较高, 能够满足绝大多数火工药剂高精度称量需求。

关键词: 高精度; 称量; 药剂; 控制系统; 火工品

中图分类号: TJ450.5 **文献标志码:** A

Design of High Precision Weighing System for Pyrotechnic Composition Based on PLC

Jin Hanlin¹, Ju Yifei¹, Liao Yun¹, She Xinji²

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

2. Henan North Hongyang Machinery & Electronics Co., Ltd., Nanyang 474679, China)

Abstract: In order to meet the needs of high precision and high efficiency of the pyrotechnic charge weighing, a high precision pyrotechnic charge weighing system based on programmable logic controller (PLC) was designed. The method adopts a mode of combining constant volume weighing and controllable vibration weighing, firstly uses a constant volume metering plate to add a large dose of medicament, then uses a PID algorithm to control a linear vibration mechanism to vibrate at a certain frequency, drives the medicament in an upper container to be added with a small dose with high precision along a material channel, judges the weight of the medicament, and rejects unqualified products. The results show that the measurement accuracy of the weighing system is less than 1 mg, and the weighing efficiency is high, which can meet the high precision weighing requirements of most of the pyrotechnics.

Keywords: high precision; weighing; medicament; control system; initiating explosive device

0 引言

火工药剂称量在火工品生产领域一直属于危险工艺, 某些高敏感度药剂稍遇摩擦就会发生爆燃事件。现有的自动化设备主要采用定容式或称重式进行称量药剂^[1]。定容式称量用恒定容积的模具装入药剂, 模具内部的药剂即为所需药剂, 药剂表面承受压力和所处环境因素会导致药剂密度有所变化^[2], 称量精度也会随着密度变化与目标有所偏差, 通过用于精度要求不高的火工药剂, 由于机构简单整体称量效率较高; 称重式称量由称重模块和加药机构 2 部分组成, 药剂通过加药机构进入称量器具, 称重模块实时反馈药剂重量^[3], 反馈值到目标重量后停止加药。在高精度药剂称量时, 加药机构传输速度受到限制, 设备整体效率较低。

火工药剂对小剂量称量通常有较高精度要求,

唯一能满足的称重式称量设备工作效率比人工还低, 无法从根本上取代人工工作, 现有火工品工厂仍采用人工称量该类药剂。人工称量速度无法满足现阶段火工品工厂生产需要, 再加上高敏感度药剂极其危险, 爆燃或爆炸事故发生频繁, 极其需要一种能够满足生产需要的设备将工人从危险环境下解脱出来。笔者根据现有称量方式的特点, 将定容式称量与称重式称量组合起来, 研发一种小于 1 mg 称量精度且高效率的称量系统。

1 高精度称量系统组成与原理

本系统主要由称量机构、桁架机械手和药杯缓存机构组成, 设备结构如图 1 所示。

称量机构由粗加机构、精加机构和称重模块 3 部分组成, 机构结构如图 2 所示。粗加机构采用定

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-09-25

第一作者: 金翰林 (1992—), 男, 辽宁人, 硕士。

容式计量板，通过气缸带动计量板可实现大剂量药剂快速添加；精加机构由伺服电机驱动直线振动机构，振动机构上方固定一个与水平夹角约 1.5° 的下斜料道，通过调整伺服电机转速来控制直线振动机构的振动频率，药剂跟随振动沿料道缓慢下落至药杯内，可实时控制小剂量药剂添加。称重模块采用托利多牌重量传感器，测量精度小于 0.1 mg 。

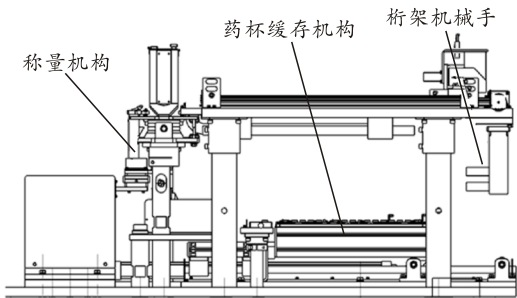


图 1 设备结构

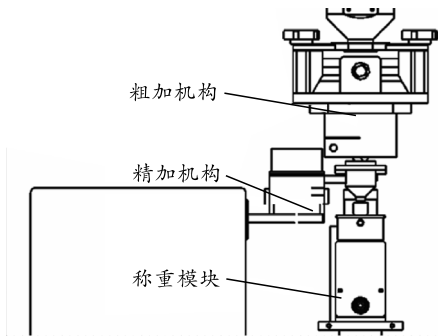


图 2 称量机构结构

桁架机械手由 2 组伺服系统和夹爪平台组成，伺服电机带动夹爪平台在平面移动。夹爪平台配备 2 组夹爪，可夹持药杯在药杯缓存机构和称量机构之间传输。药杯缓存机构用于存放生产开始前的空药杯、装完药剂的药杯和被剔废的药杯。

2 控制系统组成

本控制系统硬件由可编程逻辑控制器 (PLC)、触摸屏、光纤传感器、磁性开关、伺服电机、电磁阀和称重模块等组成，控制系统硬件构成如图 3 所示。

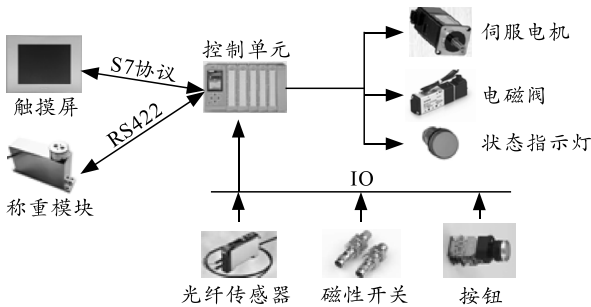


图 3 控制系统硬件构成

西门子 PLC 作为主控制器，根据采集传感器和控制信号，按照一定逻辑控制执行机构做相应运动^[4]。触摸面板用于操控设备和显示设备运行数据，通过西门子 S7 协议采集 PLC 内部数据。称重模块选择高精度重量模块，PLC 通过 RS422 协议读取称重模块的实时数据。为满足火工品工厂安全生产需求，控制系统的所有电子元器件均满足 21 区粉尘防爆要求，保证设备在称量火工药剂时安全可靠^[5]。

3 系统工作流程

系统工作流程如图 4 所示。设备启动后，桁架机械手从药杯缓存机构夹取 2 组空药杯，将其中一组药杯放入称量机构处开始称量。称量机构的粗加机构先进行工作，控制气缸带动计量板向药杯内部添加大剂量的药剂；称量机构的精加机构再根据称重模块反馈的重量与目标值的偏差，调整直线振动器的振动速度，控制上方料道内药剂缓慢掉落，药剂重量达到目标值时直线振动机构停止工作。药杯静止 1 s 后再判断药剂重量是否合格，此举为防止直线振动机构停止后仍有部分药剂滑落，药剂重量超出合格值则控制桁架机械手将药杯夹持至剔废处。药剂重量合格后桁架机械手将该组药杯夹持，将夹爪上另一组空药杯放到称量机构处后，再将装好药剂的药杯放置在药杯缓存机构上，取一组空药杯在称药机构附近等待，反复此行为直至设备停止。称量机构和桁架机械手并行工作，保证设备称量效率最大化。

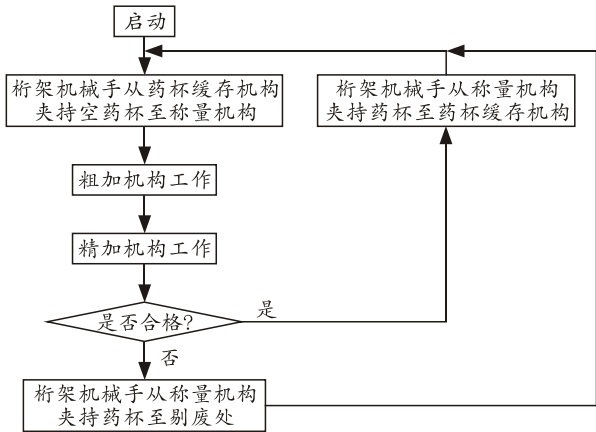


图 4 工作流程

4 精加机构控制算法

笔者采用 PID(比例-积分-微分)控制算法控制精加机构中直线振动机构。PID 控制算法是一种在控制工程中广泛应用的经典算法^[6]。它根据系统的当前状态和目标状态的偏差，通过比例、积分和微

分 3 个环节对系统进行控制,以减小偏差并达到稳定状态,PID 控制系统原理如图 5 所示。

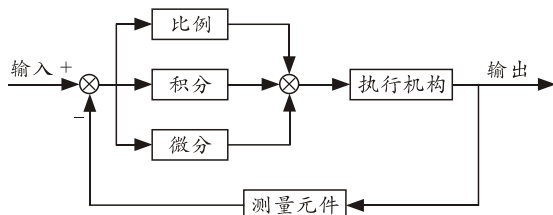


图 5 PID 控制系统原理

比例环节为根据偏差的大小,通过比例系数进行调节,以减小偏差。比例环节主要用于调整系统的输出与输入之间的关系,其作用是快速响应系统的变化。积分环节为通过对偏差进行积分运算,可以消除系统的静态误差,主要用于提高系统的控制精度和减小系统的稳态误差。微分环节为通过对偏差的变化趋势进行预测,可以提前对系统进行调节,避免系统出现大的超调或欠调,主要用于改善系统的动态性能和减小系统的调节时间。

在实际应用中,PID 控制器的输出为 3 个环节的线性组合,即:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * (de(t)/dt)。 \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为控制器的输出; $e(t)$ 为系统当前状态与目标状态的偏差; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。PID 控制器根据当前时刻的偏差 $e(t)$ 和过去时刻的偏差进行计算,得到控制量 $u(t)$,并通过执行机构对被控对象进行调节。

PID 控制器具有简单易实现、鲁棒性强、可靠性高等优点,因此在工业控制领域得到了广泛应用。结合本文中来说,其基本思想是根据称量药剂的实时重量和目标重量的偏差,通过比例、积分和微分 3 个环节对系统进行控制,控制直线振动机构以一定规律进行振动,以减小偏差并达到稳定状态。在实际应用中,需要根据药剂种类和生产环境不同选择合适的 PID 参数,以达到最佳的控制效果和稳定性。经测试 PID 控制器可以有效降低直线振动机构受外部环境和药剂颗粒不均匀造成的影响,减少称量药剂时间和提高称量精度。

5 测试

5.1 测试过程

称量第 1 阶段为粗加阶段,用于快速添加大剂量药剂,理想效果是粗加后的药剂重量无限接近目标值,利用精加机构来补齐剩余药剂,精加机构补的药剂越少,精加阶段所花费的时间越短,整体称

量效率越高;但实际测试中某些药剂的密度受外界因素较大,粗加比例过大可能会导致重量直接超过目标值,虽称量效率较高但整体合格率偏低。在测试过程中计量板容量在目标理论体积 90% 左右时,能够保证粗加后所有药剂重量少于目标重量,个别药剂最大比例可达到 95%。

称量第 2 阶段为精加阶段,用于精准补充粗加后与目标重量之间的相差药量。精加采用伺服电机驱动直线振动机构,直线振动机构的振动频率决定药剂掉落的状态。精加的好坏与振动机构振动频率相关,选择 PID 算法控制振动频率。测试出合适的 PID 参数,标准为能够快速达到目标重量且最终重量不会超过目标重量的上限。经测试,1# 药剂实时重量曲线如图 6 所示,整体称量曲线波动较小,能够较为平稳的达到目标重量 240 mg,波动能够控制在 1 mg 以内,精加称量时间控制在较低水平,完美达到称量要求。

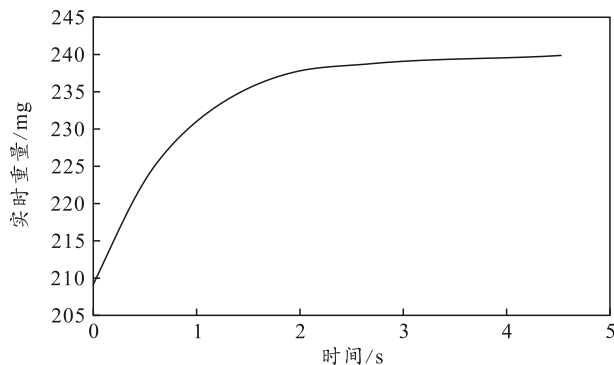


图 6 1# 药剂实时重量

5.2 测试结果与分析

为兼顾设备整体性能,对多种火工药剂进行测试,测试结果如表 1 所示。该测试所有称量指标均按照火工品正式生产参数制定。

表 1 称量结果

药剂	目标重量/mg	精度/mg	合格率/%	称量节拍/(s/发)
1#	240	±1	99.9	6.4
2#	340	±1	99.5	6.3
3#	800	±1	99.6	6.9
4#	1 150	±1	99.2	7.2

测试药剂的称量合格率均能达到 99% 以上,称量节拍能够控制在 7.2 s/发以内。抽取少量样本进行人工复检,人工复检重量与设备记录重量一致,设备测量精度准确可靠。设备正式投入生产,工作安全稳定,未出现人员受伤事故,故可判断设备的称量效率和合格率,满足国内绝大部分高精度药剂称量需求。

检查被剔废的药杯,大部分药杯内部出现较大

颗粒药剂。大颗粒产生的原因经分析为药剂在筛选时使用的筛网孔径过大，或称量环境中湿度过大产生的结块，在称量值接近目标值时大颗粒药剂掉入药杯时直接超出合格范围。经减小筛网孔径和控制称量环境温湿度后，合格率明显上升。

6 结束语

笔者针对现阶段火工药剂在高精度称量领域精度和效率无法同时满足的现象，提出一种定容式称量和称重式称量相结合的称量系统。该称量系统在称量精度小于 1 mg 条件下测试产品合格率可达到 99% 以上，称量节拍控制在 7.2 s/发以内，设备运行安全可靠，可满足国内绝大部分高精度药剂称量需求，将工人从危险的工作环境下解脱出来。

(上接第 51 页)

- [4] 陈亮, 李永刚, 刘磊, 等. 基于特征的电力信息系统注入安全漏洞检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(8): 2115-2123.
- [5] 包象琳, 熊焰, 黄文超, 等. 基于 SmartVerif 的比特币底层协议算力盗取安全漏洞发现[J]. 电子学报, 2021, 49(12): 2390-2398.
- [6] 程靖云, 王布宏, 罗鹏. 基于图表示和 MHGAT 的代码安全漏洞静态检测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(5): 1535-1543.
- [7] 赵男男, 李佳. 云计算下多属性信息交换安全漏洞识别仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 437-441.
- [8] 倪雄军, 李健俊, 李钰靓, 等. 卷接设备 IPC 控制系统网络安全监测模型的构建[J]. 烟草科技, 2022, 55(1): 99-106.
- [9] 殷博, 刘磊, 朱静雯, 等. 状态驱动的电力信息系统注入安全漏洞检测模型[J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(3): 614-621.

(上接第 77 页)

- [12] 孙义豪, 李科, 许长清, 等. 低压配电台区移动储能系统优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(12): 37-44.
- [13] 王威, 谢丽蓉, 张琦, 等. 基于优化赋权模型预测控制的风储协调策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5):

参考文献:

- [1] 付一畦. 火工微重连续称量技术及提高压药品质的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- [2] 李星奎. 火工品药剂称量天平自动检测记录仪开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [3] 葛英飞, 邱胜海, 李光荣, 等. 智能制造技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 17-20.
- [4] 廖常初. S7-1200PLC 编程及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 6-11.
- [5] 孔森, 彭旭, 晏希. 高速动态称量技术在小口径枪弹自动生产中的应用[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(5): 106-108.
- [6] 靳淑祯, 李世科. 基于 PLC 的定量称量包装控制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 124-128.
- [10] 曾纪钧, 温柏坚, 梁哲恒. 基于深度学习的安全帽识别算法研究与模型训练[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 107-112.
- [11] 王小虎, 王超, 李群, 等. 基于黑盒遗传算法的电力系统网络安全漏洞挖掘方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(5): 500-504.
- [12] 马艺新, 唐时博, 谭静, 等. 基于信息流分析的密码核设计安全验证与安全漏洞检测[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 76-83.
- [13] 邓松, 蔡清媛, 高昆仑, 等. 基于函数挖掘的能源信息物理系统数据安全风险识别算法[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 23-30, 37.
- [14] 陈春雷, 王省欣, 谭静, 等. 基于 Yosys 的硬件信息流安全验证与安全漏洞检测[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(6): 1865-1869.
- [15] 周鹏, 武延军, 赵琛. 一种 Linux 安全漏洞修复补丁自动识别方法[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(1): 197-208.
- 260-266.
- [14] 叶林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-464.
- [15] 马鑫, 衣立东, 唐瞻文, 等. 面向系统可靠性的两阶段混合储能优化配置方法[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(8): 96-104.