

基于容积闭环控制的颗粒农产品加料定量方法研究

王嘉恩

(厦门大学嘉庚学院机电工程与自动化学院, 漳州 363105)

摘要: 针对颗粒农产品定量加料精度低、自动化程度不高等问题,分析了常见颗粒农产品的物理特性,采用了以体积估计质量的定量方法,并在控制系统中引入闭环控制方案,设计了一种颗粒农产品的动态定量加料设备。该设备主要由具有可变容积量杯结构的定量装置、传送与分流机构以及复检称重秤等部分组成,在阐述机械本体结构和工作原理的基础上,提出了一种基于历史离散数据拟合预测误差的闭环控制算法,当复检工序检测到加料质量与目标质量存在差值时,可通过闭环控制系统补偿修正定量加料工序的量杯容积,从而减小定量加料的误差。实验结果表明,该设备可实现颗粒农产品的高精度动态定量加料,具有抗扰动和自适应能力。以大米、黄豆、芸豆为实验对象,在旋转盘转速为 4 r/min 的工作条件下,经过 3 组闭环反馈调节,加料质量误差可稳定控制在 1% 以内。

关键词: 农产品; 颗粒料; 定量加料; 闭环控制; 最小二乘法; 丝杠螺母副

中图分类号: S233.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0410-08

OSID:



Quantitative Method of Granular Agricultural Products Feeding Based on Volume Closed-loop Control

WANG Jiaen

(School of Mechanical and Electrical Engineering & Automation, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou 363105, China)

Abstract: Aiming at the problems of low precision and low automation in quantitative feeding of granular agricultural products, the physical characteristics of common granular agricultural products were analyzed. A quantitative method based on volume estimation of mass was adopted, and a closed-loop control scheme was introduced into the control system. A dynamic quantitative feeding equipment for granular agricultural products was developed. The equipment mainly consisted of a quantitative device with a variable volume measuring cup structure, a transmission and distribution mechanism, and a reinspection weighing scale. Based on the explanation of the mechanical structure and working principle, a closed-loop control algorithm based on historical discrete data fitting prediction error was proposed. When the reinspection process detected a difference between the feeding quality and the target quality, the volume of the measuring cup in the quantitative feeding process would be compensated and corrected through a closed-loop control system, thereby reducing the error of quantitative feeding. The results of experiment showed that the equipment could achieve high-precision dynamic quantitative feeding of granular agricultural products with anti-interference and adaptive capabilities. Taking rice, soybeans, and kidney beans as the experimental object, the feeding quality error could be stably controlled within 1% after three sets of closed-loop feedback adjustments when the rotational speed of the turntable was 4 r/min. And the quantitative accuracy was far higher than that of the national requirement for the allowable shortage of quantitatively packaged goods.

Key words: agricultural products; granular material; quantitative feeding; closed-loop control; least square method; screw nut pair

收稿日期: 2023-12-04 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目(JAT210633)

作者简介: 王嘉恩(1995—),男,讲师,主要从事动态称重技术研究,E-mail: 1576471088@qq.com

0 引言

在农产品销售之前,为生鲜农作物进行包装保鲜是必不可少的环节。在生产包装中,有许多农作物产品的外形呈现颗粒状、粉末状或类球状,如大米、豆类、坚果、中药丸剂、植物种子等。由于颗粒农产品具有外形体积不均、易分散等特点,在进行定量包装时,其质量往往难以计量,因此许多学者针对颗粒农产品的固有特点,研究并提出了许多定量方法。物料加料的定量方法,总体上分为容积式加料定量、称重式加料定量(按照行业习惯,本文将称量质量称为称重,称量结果为质量)、组合式加料定量等。其中,容积式加料定量方法一般采用固定容积的量杯量取等体积的物料^[1]。该方法可实现快速地动态定量加料,但由于颗粒料存在颗粒体积不均、不同批次下等体积的密度不等现象,因此得到的加料质量常具有较大的波动。称重式加料定量方法可分为静态称重和动态称重两种。静态称重是一种多次不连续加料称重的加料重量闭环控制方法。该静态称重方法在一次定量称重过程中需要停机并多次加减物料^[2],生产效率不高,适用于小批量、小质量的物料定量包装。动态称重是一种连续加料称重的加料重量闭环控制方法。该动态称重结构种类较多,有皮带秤、料斗秤、转子秤、螺旋秤等^[3]。如皮带秤结构在传送带的支承结构上布置称重传感器,通过传感器动态称量传送带上运动的物料。该称重方法需要充分考虑传送带及物料运动产生的振动对称重精度的影响,常需对称重信号进行滤波、采样等数值分析^[4-8],且该称重方法仍然不具有高精度和高鲁棒性。料斗秤是通过控制料斗的下料流量来监测秤斗的实时称重数值,当称重数值与设定值匹配时,停止料斗下料,从而得到定量的物料^[9]。该称重方法需要估计物料下落对秤斗的冲击载荷与停止下料时空中物料的质量,具有较大的称重误差。有学者对该方法进行改进,将料斗设计为粗、细两个料斗,先由粗料斗快速下料,当称重数值接近设定值时,关闭粗料斗,打开细料斗下料,减小下料冲击和大流量下料带来的误差^[10-12]。组合式加料定量方法是容积式与称重式加料定量方法的组合,一般先以体积估计质量,采用大容积量杯快速量取大部分目标质量,再以小流量加料估计剩余物料质量^[13]。该方法可以减少加料时间,提高定量加料效率,同时也可以减小下料冲击和大流量下料导致的误差。

以上几种不同的物料加料定量方法在功能上各有优缺点,但在高精度的定量控制上,缺少智能的闭环控制环节。本文基于容积式加料定量方法,设计

开发闭环控制系统,以实现当加料质量出现较大误差或定量精度不满足要求时,所开发的控制系统能识别误差,并快速采取相应策略减小误差。

1 闭环控制系统方案

在定量包装生产线上,既要进行快速定量加料,又需要对加料质量进行高精度控制。所以,本文采用可实现快速定量加料的容积式加料定量方法。同时,为减少因颗粒料外形体积不均导致的等体积物料质量波动问题,引入闭环控制方案。在定量加料工序之后增加一道复检工序对加料质量进行实时监测。同时,为实现颗粒农产品包装质量可调可控,将固定容积的量杯设计为可调容积的结构。当复检工序检测到加料质量与目标质量存在差值时,通过闭环控制系统反馈调节定量加料工序的量杯容积,从而减小定量加料的误差,达到高精度的控制要求。

在该闭环控制系统中,复检工序作为监测和检验的重要手段,是保障产品包装质量的重要屏障,其定量精度关系到整个系统的控制精度。所以,本文采用称重精度高的静态称重作为复检工序的定量方法。静态称重方法不仅能减少复杂的传感器布置结构,而且不用考虑称重信号的响应时间、滤波算法等,可以得到较高精度和可靠性的称重结果^[14]。静态称重方法的不足之处在于称重效率较低,不符合定量包装生产的高精高效要求。但从产品的整条定量包装生产线分析,物料从定量加料工序到复检工序,需要一定的传送时间,所以可在传送过程中设计分流机构布置多个静态称重工位,通过分流称重为静态称重留出足够的时间裕量,则可解决静态称重效率不高、无法匹配定量加料工序的问题^[15]。

若在同一批次下,静态复检称重工序检测的质量误差波动较大,则说明料斗仓内的颗粒农产品未混合均匀,出现小颗粒、大颗粒物料分层分布现象,甚至存在粘结问题。此时可同样采用闭环控制方案。在料斗仓内设计安装搅拌机构,当复检工序检测到质量误差数值异常时,通过闭环控制系统反馈控制搅拌机构工作,使料斗仓内的颗粒料混合均匀,减小以体积估计质量的定量加料误差。

2 机械本体结构设计

根据系统控制要求,设备的机械结构包括料斗搅拌机构、定量加料工序的可变容积量杯结构、包装工序的塑封装置、复检工序的剔除机构和多工位静态称重结构。其中,搅拌机构的结构设计若采用杆件机构进行高速搅拌,则可能破坏颗粒料外观,所以采用双螺旋式叶片结构,能够在低速转动下对物料

进行充分搅拌。

为实现量杯容积的可调可控,本文设计一种可伸缩式的量杯结构,即在传统固定容积的量杯结构外侧再套一个更大直径的量杯,当大直径量杯在固定容积量杯上移动时,可改变该量杯结构的容积。参考市面上已有量杯的内、外径,并结合高精度小量程的定量加料实验需要,选用截圆内径 41 mm、外径 45 mm、高度 70 mm 的固定容积量杯,选用截圆内径 46 mm、外径 50 mm、高度 70 mm 的大直径量杯。同时,大直径量杯直线运动的驱动元件采用具有传动效率高、定位精度高的滚珠丝杠螺母副,其轴径为 20 mm,导程为 4 mm。为提高定量加料的工作效率,将 6 个量杯结构均匀布置在一个旋转盘上,旋转盘旋转运动的驱动元件采用滚珠花键副。定量加料工序的机械结构如图 1 所示。

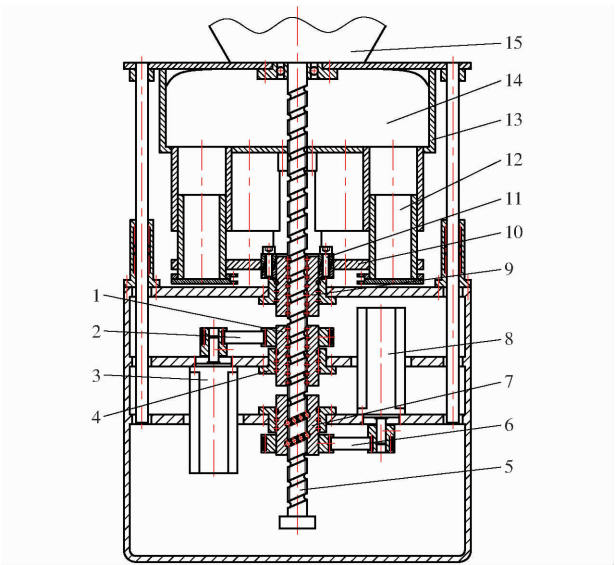


图 1 定量加料工序机械结构图

Fig.1 Mechanical structure diagram of quantitative feeding process

1. 花键套 A 2. 同步带轮副 A 3. 电机 A 4. 法兰盘 5. 滚珠丝杠花键轴 6. 同步带轮副 B 7. 螺母套 8. 电机 B 9. 花键套 B 10. 限位板 11. 胀紧套 12. 量杯 13. 旋转盘 14. 挡板 15. 料斗机构

图 1 中,箱体的上半部分结构是该工序的执行机构,主要由料斗机构、挡板、旋转盘和量杯组成。其中,旋转盘与下方的滚珠丝杠花键轴的上端固连,旋转盘底部沿圆周均匀布置 6 个可变容积的量杯结构。当旋转盘作旋转运动时,可带量杯作旋转运动,当旋转盘作上下直线运动时,可改变量杯的容积。箱体的下半部分结构是该工序的动力输出机构,主要由两台电机、两组同步带轮副、滚珠丝杠螺母副和滚珠花键副组成。其中,为增大电机的输出转矩,电机 A 的输出轴通过同步带轮副传动,考虑到实际的空间布

局,取同步带轮副传动减速比为 3。然后从动同步带轮带动花键套作旋转运动。花键套的另一端通过法兰盘安装在箱体上,花键套的内孔通过滚珠安装在丝杠花键轴两侧的键槽上,使得花键套能够在滚珠的作用下沿着键槽作直线移动。电机 B 的输出轴同样通过同步带轮副传动,然后从动同步带轮带动滚珠丝杠螺母副的螺母套作旋转运动。螺母套的另一端通过法兰盘安装在箱体上,螺母套的内孔通过滚珠螺旋安装在丝杠花键轴的螺旋槽上。该结构对丝杠花键轴的驱动均采用滚珠作为传动介质,将传动过程中的滑动摩擦改进为滚动摩擦,有效地提高了电机传动效率,延长了机械使用寿命。

机械结构的工作原理分为两种情况,一种是旋转盘作旋转运动,另一种是作螺旋运动(直线运动与旋转运动的合成)。当不需要调节量杯容积时,旋转盘作逆时针旋转运动,即滚珠丝杠花键轴只作旋转运动。此时,电机 A 的传动链作为动力输出机构,电机 A 的输出轴作逆时针旋转运动(以目视电机输出轴端面判断)带动同步带轮副运动,从动同步带轮作逆时针旋转运动带动花键套逆时针旋转,然后花键套通过滚珠带动丝杠花键轴作逆时针旋转运动。当丝杠花键轴逆时针旋转时,在电机 B 的传动链即丝杠螺母副的传动链中,因为螺母套被法兰盘限制移动,所以此时丝杠轴将同时作直线运动和旋转运动,即螺旋运动。为抵消丝杠轴的直线运动,螺母套需同时作相同方向的旋转运动,即电机 B 需作顺时针旋转运动,然后通过同步带轮副传动,带动螺母套作逆时针旋转运动。此时,在箱体上方的执行机构中,颗粒料与旋转盘共同作逆时针旋转运动。随后,旋转盘中超出量杯顶部的颗粒料被挡板挡住,使得量杯中恰好装满颗粒料,然后量杯继续旋转至出料口,得到一份与量杯等体积的颗粒料。通过以体积估计质量的方法,即得到一份定量的颗粒料。因为沿旋转盘圆周分布有若干个量杯,所以在一个工作循环中,旋转盘旋转 1 r 可得到多份定量的颗粒料,极大地提高了定量加料效率。

当闭环控制系统判定需要调节量杯容积时,旋转盘在作旋转运动的同时需向上或向下运动以改变量杯的容积,即丝杠花键轴需既作旋转运动又作直线运动。此时,电机 A 的传动链带动花键套作逆时针旋转运动,花键套带动丝杠花键轴作旋转运动。在电机 B 的传动链中,螺母套的运动状态决定了丝杠花键轴的上下移动量,需通过精确计算来控制旋转速度,如表 1 所示。

表 1 定量加料工序的动力元件运动状态

Tab.1 Power component movement status in quantitative feeding process

丝杠花键轴	电机 A	电机 B
逆时针旋转	逆时针旋转	顺时针旋转（与电机 A 同转速）
螺旋慢速上升	逆时针旋转	顺时针旋转（比电机 A 转速慢）
螺旋中速上升	逆时针旋转	静止
螺旋快速上升	逆时针旋转	逆时针旋转
螺旋下降	逆时针旋转	顺时针旋转（比电机 A 转速快）

由表 1 可归纳得：电机 A 是当系统不需要调节量杯容积时旋转盘作逆时针旋转的动力输出元件；电机 B 是当系统需要调节量杯容积时旋转盘作上下移动的动力输出元件。

根据系统控制要求，定量加料后的物料需要进行复检称重，复检称重工序的多工位称重结构如图 2 所示。

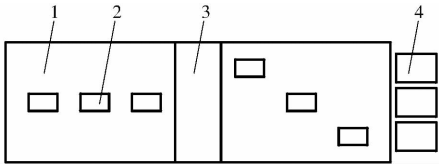


图 2 复检工序多工位称重结构示意图

Fig.2 Diagram of multi station weighing structure for reinspection process

1. 传送带 2. 物料 3. 分流机构 4. 复检称重秤及剔除、卸料机构

图 2 中，定量加料后的物料落在传送带的左端，物料随传送带向右传送，然后传送带上的分流机构通过编程控制可依次循环地将物料分到 3 个传送通道上。当第一通道上的物料经传送到达复检称重秤后，称重仪表将物料的静态称重质量与目标质量进行对比分析。若存在差值，则将该差值进行数值转换然后通过闭环控制系统实时反馈调节定量加料工序的量杯容积。若差值超出国家《定量包装商品计量监督管理办法》或企业更严苛规定的允许短缺量，则将该物料剔除生产线，若差值在允许短缺量的范围内，则将该物料传送至出料口。复检称重秤及剔除、卸料机构结构如图 3 所示。

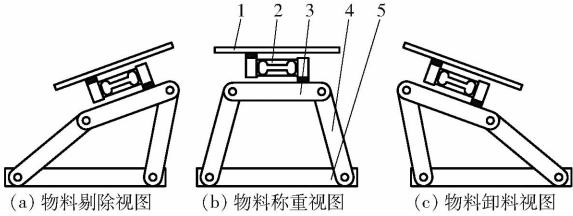


图 3 复检称重秤及剔除、卸料机构结构示意图

Fig.3 Structure diagrams of reinspection weighing scale, removal and unloading mechanism

1. 称重盘 2. 称重传感器 3. 连杆 4. 主动杆 5. 固定机架

图 3 中，复检称重秤由称重传感器与称重盘构

成，称重传感器悬臂布置在双摇杆机构的连杆上，通过控制双摇杆机构主动杆的转动角度可以改变称重盘的工作状态。当物料经传送到达复检秤时，称重盘为水平放置并对物料进行称重，如图 3b 所示。当物料所称质量不符合相应标准时，由主动杆顺时针转动驱动连杆向左倾斜将物料剔除，如图 3a 所示。当物料所称质量符合相应标准时，由主动杆逆时针转动驱动连杆向右倾斜将物料输送至出料口，如图 3c 所示。在剔除物料时，若主动杆到达右极限位置，则双摇杆机构将处于死点位置，应避免运动到此位置。

3 误差分析与控制

本文采用容积式加料定量方法，颗粒农产品的杯装容积与质量的关系为

$$V = \frac{1\,000m}{\rho_c} \tag{1}$$

式中 m ——当前设备的包装目标质量，g
 V ——颗粒农产品杯装容积，mm³
 ρ_c ——颗粒农产品杯装堆积密度，g/cm³

在定量加料工序中，根据量杯的机械传动结构，并结合电机 A、电机 B 转速等，可得到量杯容积 V 表达式为

$$V = V_0 + \left(\frac{n_1 + n_2}{60I} P_h t + h_0 \right) \pi r^2 \tag{2}$$

式中 V_0 ——量杯基础容积，mm³
 h_0 ——量杯初始高度，mm
 r ——量杯底部截圆半径，mm
 P_h ——丝杠导程，mm
 I ——电机减速比
 t ——闭环反馈调节时电机运行时间，s
 $n_1、n_2$ ——电机 A、电机 B 转速（区分旋转方向，逆时针为正），r/min

由表 1 可知， $n_1 + n_2$ 为零值时，旋转盘作逆时针旋转运动； $n_1 + n_2$ 为正值时，旋转盘作逆时针螺旋上升运动； $n_1 + n_2$ 为负值时，旋转盘作逆时针螺旋下降运动。

初始化时，闭环控制系统未介入，旋转盘只作旋转运动，即令 $n_1 + n_2 = 0$ ，根据式（1）、（2），由目标质量 m 可计算出量杯初始高度为

$$h_0 = \frac{1\,000m}{\rho_c \pi r^2} - \frac{V_0}{\pi r^2} \tag{3}$$

在复检工序中，设复检所称质量为 m_i ， i 为称重次数（ $i = 1, 2, \dots$ ），则该次质量误差为

$$e_i = m_i - m \tag{4}$$

由于在定量加料工序中，系统采用动态的容积

式加料方法,颗粒料本身的颗粒大小分布,设备内部各机构间的摩擦振动以及外部工作环境的不确定因素等都会对定量精度产生影响。其中,系统误差有同步带轮副传动、丝杠螺母副传动的回程差等。随机误差主要由工作环境的不确定因素影响产生。粗大误差包括料斗机构未及时进料导致加料质量偏小、挡板未刮平量杯顶部导致加料质量偏大等。因此为使控制系统能够智能自适应不同工况的影响,基于静态复检称重得到的误差,可通过一些算法计算预测将来可能产生的误差,然后提前通过闭环控制系统进行补偿修正,达到减小误差的目的。针对本文所设计的设备结构及加料定量方法,由于旋转盘旋转 1 r 可得到多份定量的物料,因此并不适合采用迭代法^[16]、PID 控制^[17-18]等传统控制算法。若采用复杂的智能算法,如模糊算法^[19]、神经网络算法^[20-24]等,则需要对质量误差进行实时分析计算,对控制器的运行能力有较高要求。若需要调用专门的数学工具箱,则还需要通过上位机与 Matlab 软件进行在线数据通讯^[25],影响了系统闭环反馈的工作效率。所以,对于多因素影响的复杂测量模型,基于多份物料的历史复检质量,本文采用离散数据的最小二乘法来预测未知的误差,获得动态的定量加料误差和未知误差的最优无偏估计量^[26]。

一般地,系统受不确定因素影响产生的随机误差服从正态分布,设误差数据总体 $e \sim N(\mu, \sigma^2)$, 旋转盘每旋转 1 r 可得到一个容量为 n 的样本 $(e_1, e_2, \dots, e_n)$, 则对于给定的置信度为 $1 - \alpha$ 的双侧置信区间为 $\left[\bar{e} - \frac{S}{\sqrt{n}}t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1), \bar{e} + \frac{S}{\sqrt{n}}t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)\right]$, 其中 $\bar{e}$ 为样本均值, S 为样本标准差。

通过求出该误差均值的置信区间,则可剔除样本中不属于该区间的粗大误差。若某一项误差被剔除掉,则将样本均值赋值给该项,保证样本容量的一致性。

经实验数据分析,在有限次测量中,每份物料的质量具有较好的线性相关性,所以采用最小二乘法的一次多项式拟合(直线拟合)。设一次多项式拟合直线为

$$\varphi(i) = a_0 + a_1 i$$

(5)

记 $\varphi(i)$ 与 e_i 差的平方和为

$$g(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n [e_i - (a_0 + a_1 i)]^2$$

(6)

由取极值的必要条件

$$\frac{\partial g}{\partial a_0} = \frac{\partial g}{\partial a_1} = 0$$

(7)

得

$$\begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n [e_i - (a_0 + a_1 i)] = 0 \\ -2 \sum_{i=1}^n i[e_i - (a_0 + a_1 i)] = 0 \end{cases}$$

(8)

经移项、换算可得

$$\begin{cases} na_0 + \frac{n(n+1)}{2}a_1 = \sum_{i=1}^n e_i \\ \frac{n(n+1)}{2}a_0 + \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}a_1 = \sum_{i=1}^n ie_i \end{cases}$$

(9)

式(9)的系数行列式为

$$D = \begin{vmatrix} n & \frac{n(n+1)}{2} \\ \frac{n(n+1)}{2} & \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \end{vmatrix} = \frac{n^2(n+1)(n-1)}{12}$$

(10)

所以,当 $n > 1$ 时,行列式 $D \neq 0$, 则式(9)有唯一解,可求出 a_0, a_1 的值,即可得到拟合直线 $\varphi(i)$ 的解析式。

令 $i = n + 1$, 由式(5)可得 $\varphi(n + 1) \approx e_{n+1}$, 记为 e_{n+1}^* , 即

$$e_{n+1} \approx e_{n+1}^* = \varphi(n + 1) = a_0 + a_1(n + 1)$$

(11)

设闭环控制系统反馈值为

$$\Delta m = -e_{n+1}^*$$

(12)

由式(12)可知,系统根据前 n 次质量误差可预测下一次误差。最后,根据式(1)、(2)将反馈值 Δm 转换成量杯容积变化量为

$$\Delta V = \frac{1\,000\Delta m}{\rho_c} = \frac{n_1 + n_2}{60I}P_h t \pi r^2$$

(13)

式(13)可反映当前质量误差下,对电机 A、B 的转速差要求,则可得到闭环反馈调节时电机 B 的转速公式为

$$n_2 = \frac{60\,000I\Delta m}{P_h t \pi r^2 \rho_c} - n_1$$

(14)

其中, n_1 可根据产品种类、生产规格、包装效率等需求进行确定。同时,在特定工作条件下,可确定反馈调节时电机 B 运行时间 t , 即可由式(14)计算出电机 B 转速。

4 实验与结果分析

本文采用三菱 PLC 作为控制器,型号为 FX5S-30MT/ES,输出形式为晶体管漏型输出,三菱伺服放大器型号为 MR-JE-10A,三菱伺服电机型号为 HG-KN13J-S100。PLC 使用相对定位指令 DRVI 进行控制,共有 4 个操作数,分别为:脉冲输出数

目、脉冲输出频率、脉冲输出的位软元件、旋转方向的位软元件。其中,脉冲输出数目与输出频率为控制变量,需要根据误差反馈值 Δm 来计算。设脉冲输出数目为 N ,脉冲输出频率为 f ,则伺服电机转速为

$$n = \frac{60f}{F} \tag{15}$$

式中 F ——电机每转输入脉冲数

联立式(14)、(15)可得到控制电机 B 的脉冲输出频率为

$$f_B = \frac{1\,000FI\Delta m}{P_h t \pi r^2 \rho_c} - \frac{Fn_1}{60} \tag{16}$$

所以,在特定时间内可得到控制电机 B 的脉冲输出数目为

$$N_B = f_B t = \frac{1\,000FI\Delta m}{P_h \pi r^2 \rho_c} - \frac{Fn_1 t}{60} \tag{17}$$

系统的闭环控制流程图如图 4 所示。

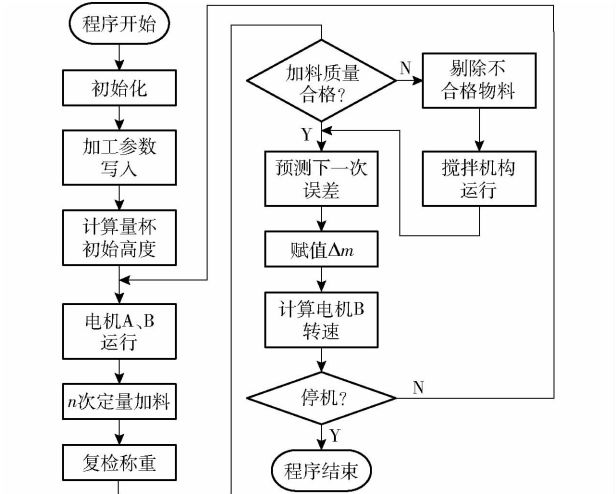


图 4 闭环控制系统流程图

Fig. 4 Flowchart of closed-loop control system

实验选取 3 种常见的具有代表性形状的颗粒农产品,分别为大米、黄豆、芸豆来验证设备的定量方法与控制系统的正确性。实验前期在常温下以截圆直径 46 mm、高度 70 mm 的量杯对实验对象的杯装堆积密度进行测量,取定量目标质量 m 为 110 g,由式(3)可求出量杯初始高度 h_0 ,实验参数如表 2 所示。

表 2 定量加料实验参数

Tab. 2 Parameters of quantitative feeding experimental

实验对象	杯装堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	定量目标 质量/g	量杯初始 高度/mm
大米	0.92	110	16.4
黄豆	0.77	110	30.4
芸豆	0.80	110	27.2

取电机每转输入脉冲数 F 为 1 000,设电机 A

脉冲输出频率 f_A 为 200 Hz,则由式(15)得,电机 A 转速 n_1 为 12 r/min。在机械零件参数中,电机减速比 I 为 3,初始化时,闭环控制系统未介入,旋转盘只作逆时针旋转运动,即电机 B 转速 $n_2 = -n_1 = -12$ r/min,旋转盘转速为 4 r/min,黄豆 110 g 定量加料实验实物图如图 5 所示。

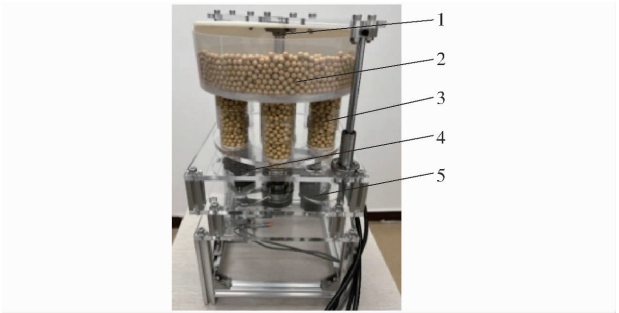


图 5 黄豆 110 g 定量加料实验实物图

Fig. 5 Physical image of 110 grams soybean in quantitative feeding experiment

1. 丝杠花键轴 2. 旋转盘 3. 量杯 4. 电机 B 5. 电机 A

根据旋转盘底部布置的量杯数量,取 6 份为一组样本,即 $n = 6$,取置信度为 95%,即 $\alpha = 0.05$,则可查 t 分布表得 $t_{0.025}(5) = 2.5706$,得双侧置信区间为 $\left[\bar{e} - 2.5706 \frac{S}{\sqrt{6}}, \bar{e} + 2.5706 \frac{S}{\sqrt{6}}\right]$ 。

根据式(11)预测下一组实验误差,对闭环反馈值 Δm 进行修正。取闭环反馈调节时电机 B 的运行时间 t 为 2 s,丝杠导程 P_h 为 4 mm,则由式(16)、(17)可得控制电机 B 的脉冲输出频率 f_B 、脉冲输出数目 N_B 。以此类推,不断以上一组样本数据预测下一组实验误差,从而提前改变量杯容积对可能存在的误差进行补偿修正,各实验对象加料质量折线图如图 6 所示,闭环反馈值 Δm 的参数如表 3 所示。

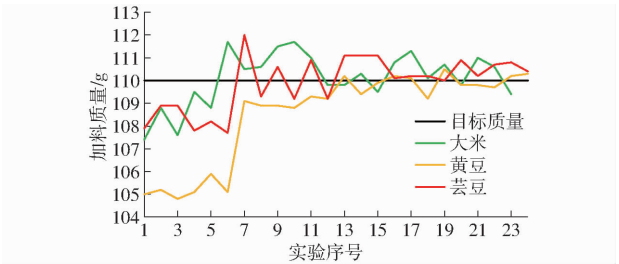


图 6 110 g 定量加料实验加料质量折线图

Fig. 6 Feeding quality line chart of 110 grams quantitative feeding experiment

从图 6 可以看出,3 种实验对象的初始加料质量都偏小,原因是由于可变容积量杯结构是由两种不同规格的量杯嵌套在一起,在量杯的过渡区域颗粒料无法紧密填充,导致量杯容积内颗粒料质量偏小。图 6 中,黄豆初始加料质量最低,由于不同批次颗粒农产品的实际杯装堆积密度与系统程序中的设

表 3 定量加料实验中 Δm 参数

Tab.3 Parameters of Δm in quantitative feeding				
experiment				g
实验对象	组次			
	1	2	3	4
大米	1. 17	- 1. 27	- 1. 22	- 0. 01
黄豆	4. 54	0. 81	0. 43	- 0. 02
芸豆	2. 19	0. 84	0. 19	- 0. 70

定值存在偏差,因此初始加料质量会有波动,说明该批次黄豆颗粒较大,其杯装堆积密度较小,导致量杯容积内黄豆质量偏小。由图 6 和表 3 综合分析,尽管由于各种因素导致初始加料质量与目标质量存在误差,但通过闭环控制算法求出第 1 组实验的反馈值 Δm 都大于零,即系统可智能反馈调节增大量杯容积。由于黄豆初始加料质量最低,因此在第 1 组时反馈值也最大。在第 1 组加料实验后,3 种实验对象加料质量都明显趋近于目标质量。在第 2 组,颗粒较小的大米的加料质量超过目标质量并进行反向调节,芸豆加料质量开始在目标质量附近波动,而初始加料质量最低的黄豆则在逼近目标质量。在第 3 组加料实验后,3 种实验对象的加料质量均趋于稳定,并在目标质量附近波动。实验结果表明,颗粒越小的实验对象越快趋近于目标质量,但若系统程序中设定的堆积密度与实验对象的堆积密度相差较大

时,则会影响实验初始加料质量,进而影响加料质量趋近于目标质量的速度。在速度与稳定性方面,3 种实验对象经过 3 组的闭环反馈调节后,加料质量误差均在 1% 以内,符合高精度定量加料要求。

5 结论

- (1)采用容积式加料定量方法,设计了一种颗粒农产品的动态定量加料设备。该设备主要由具有可变容积量杯结构的定量装置、传送与分流机构以及复检称重秤等部分组成。其中,定量装置采用了滚珠丝杠螺母副和滚珠花键套等传动机构,实现了对量杯容积的精确控制。
- (2)提出了一种基于历史离散数据拟合预测误差的闭环控制算法,当复检工序检测到加料质量与目标质量存在差值时,可通过闭环控制系统补偿修正定量加料工序的量杯容积,从而减小定量加料的误差。
- (3)实验结果表明,该设备可实现颗粒农产品的高精度动态定量加料,具有抗扰动和自适应能力。以大米、黄豆、芸豆为实验对象,在旋转盘转速为 4 r/min 的工作条件下,经过 3 组闭环反馈调节,加料质量误差可稳定控制在 1% 以内。同时,该设备结构和控制算法可为其他高精度定量加料应用提供技术借鉴。

参 考 文 献

[1] 王嘉恩, 聂晓根. 食盐及其类形物的高精度定量包装设备研究[J]. 计量学报, 2022, 43(4): 494 - 500.
WANG Jiaen, NIE Xiaogen. Research on high precision quantitative packing equipment for salt and its kinds[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(4): 494 - 500. (in Chinese)

[2] 王嘉恩, 聂晓根. 基于闭环控制的高精度挤出橡胶在线定重分剪系统研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 137 - 141.
WANG Jiaen, NIE Xiaogen. Research on on-line weighing and shearing system of high precision extruded rubber based on closed-loop control[J]. Machine Design and Research, 2020, 36(5): 137 - 141. (in Chinese)

[3] 王江华. 超细粉末自动包装配重系统的设计与研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
WANG Jianghua. Design and research on counterweight system of ultrafine powder automatic packaging production line[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. (in Chinese)

[4] GALIN I A. Verification of continuous multichannel belt-conveyor weighers[J]. Measurement Techniques, 2016, 59(1): 34 - 40.

[5] 朱亮, 李东波, 吴崇友, 等. 基于数据挖掘的电子皮带秤皮带跑偏检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 102 - 109.
ZHU Liang, LI Dongbo, WU Chongyou, et al. Detection of belt deviation of belt weigher using data mining[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 102 - 109. (in Chinese)

[6] ALEKSANDROVIĆ S, JOVIĆ M. Analysis of belt weigher accuracy limiting factors [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2011, 31(5): 223 - 241.

[7] 刘悦. 基于 PLC 控制的取料机在线动态称重计量[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
LIU Yue. Dynamic weighing measurement on-line of reclaimers based on PLC control[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018. (in Chinese)

[8] 朱亮, 吴绍锋, 何非, 等. 采用 PELM 的阵列式皮带秤称重误差建模与补偿[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(5): 724 - 731.
ZHU Liang, WU Shaofeng, HE Fei, et al. Measurement error modeling and compensation for array belt weigher using process extreme learning machine[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(5): 724 - 731. (in Chinese)

[9] 马年拾. 基于 PLC 的硅铁自动配料系统的设计[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
MA Nianshi. Design of ferrosilicon batching automatic control system based on PLC[D]. Lanzhou: Lanzhou University of

Technology, 2017. (in Chinese)

[10] 卢肖颖. 动态定量称重控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
LU Xiaoying. Research on the dynamic quantitative weighing control system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[11] ZHANG Dong. Design of double closed loop for granular material automatic weighing system[C] // 2015 Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference. Atlantis Press, 2015: 1127 – 1135.

[12] 苏俊明, 李振亮, 李亚, 等. 称重式包装机两级给料最优切换点的确定方法[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 99 – 103.
SU Junming, LI Zhenliang, LI Ya, et al. Determination on optimal switching point of two-stage feeding in weighing packaging machine[J]. Food & Machinery, 2015, 31(1): 99 – 103. (in Chinese)

[13] 张西良, 路欣, 毛翠云. 粉粒状物料混合式定量充填技术研究[J]. 计量学报, 2003, 24(4): 310 – 313.
ZHANG Xiliang, LU Xin, MAO Cuiyun. Study on the techniques of composite type quantifying-filling for powder and particle materials[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(4): 310 – 313. (in Chinese)

[14] 黄建龙, 高艳雯, 王英光. 动态测量转变为静态测量的新型称重系统[J]. 矿山机械, 2007, 35(5): 82 – 84, 6.
HUANG Jianlong, GAO Yanwen, WANG Yingguang. New type weighing system changing dynamic measurement in static measurement[J]. Mining & Processing Equipment, 2007, 35(5): 82 – 84, 6. (in Chinese)

[15] 韩乔生, 芦金石, 陶学恒, 等. 高效高精度动态静态组合块状食品称重分选系统[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 89 – 93.
HAN Qiaosheng, LU Jinshi, TAO Xueheng, et al. Efficient high-precision dynamic and static combination of bulk food weighing sorting system[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 89 – 93. (in Chinese)

[16] 刘博, 刘晓, 李明, 等. 基于迭代学习控制的投料机称重控制系统设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(6): 101 – 103, 109.
LIU Bo, LIU Xiao, LI Ming, et al. Design of weighing control system of screw feeder based on iterative learning control[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(6): 101 – 103, 109. (in Chinese)

[17] 郭浩, 冯进良, 张尧禹, 等. 药筒容积的高精度测量分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 758 – 762.
GUO Hao, FENG Jinliang, ZHANG Yaoyu, et al. High precision measurement of cartridge volume[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 758 – 762. (in Chinese)

[18] 王辉, 刘艺豪, 周利明, 等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 32 – 40, 94.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32 – 40, 94. (in Chinese)

[19] 索小娟, 卫前伟. 改进模糊 PID 的称重式包装机智能控制[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 55 – 60.
SUO Xiaojuan, WEI Qianwei. Intelligent control of weighing packaging machine based on improved fuzzy PID[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(1): 55 – 60. (in Chinese)

[20] 欧青立, 吴兴中, 欧达贤. 钢包炉配料 PSO – BP – PID 控制研究[J]. 控制工程, 2013, 20(5): 825 – 828, 832.
OU Qingli, WU Xingzhong, OU Daxian. PSO – BP – PID control of ladle furnace proportioning system[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(5): 825 – 828, 832. (in Chinese)

[21] LI Bingying, LI Yongxin, WANG Haitao, et al. Compensation of automatic weighing error of belt weigher based on BP neural network[J]. Measurement, 2018, 129: 625 – 632.

[22] ZHU Jingfei, XU Shaojie, LI Yongwei. The system design of granular bulk materials continuous conveyor weighing measurement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 345: 145 – 149.

[23] 卢君宜, 周丽红. 动态定量称重系统控制策略的研究[J]. 科技通报, 2017, 33(7): 77 – 80.
LU Junyi, ZHOU Lihong. Study of control strategy for dynamic quantitative weighing system[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(7): 77 – 80. (in Chinese)

[24] 贺志将, 李前, 王彦超, 等. 基于 VMD – LSTM 的奶牛动态称量算法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 234 – 240.
HE Zhijiang, LI Qian, WANG Yanchao, et al. Cow dynamic weighing algorithm based on VMD – LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 234 – 240. (in Chinese)

[25] 刘忠超, 盖晓华. 基于机器视觉和 PLC 的猕猴桃分级控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 131 – 135.
LIU Zhongchao, GAI Xiaohua. Design of kiwifruit grading control system based on machine vision and PLC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 131 – 135. (in Chinese)

[26] 臧立娟, 王凤艳, 王明常, 等. 测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2018.