

多功能组合秤控制系统设计及优化算法研究

安世奇 孙 瑞

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266000)

摘 要: 针对称重物品形状不规则、质量不均匀造成的称重精度下降及效率低问题,设计开发一款基于 STM32 单片机的嵌入式多功能组合秤控制系统。该系统引入模块化的设计理念,采用集散控制方式。硬件方面分别对系统的电源模块、主控模块、AD 数据采集模块、步进电机驱动模块进行了电路的规范化设计。软件方面通过建立嵌套函数以及对组合算法的优化,提高了组合的效率和合格率。经现场测试,组合速度在 65 包/min 时误差能控制在 0.5% 以内,达到预期效果。

关键词: 嵌入式;组合秤;集散控制;组合优化

中图分类号: TP23;TN02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Research on design and optimization algorithm of multi-functional combination scale control system

An Shiqi Sun Rui

(School of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: Aiming at the problem of weighing accuracy and low efficiency caused by irregular shape and uneven quality of weighing objects, an embedded multi-function combination scale control system based on STM32 single-chip microcomputer was designed and developed. The system introduces a modular design concept and adopts distributed control. The hardware is standardized on the power module, main control module, AD data acquisition module and stepper motor drive module of the system. The software aspect improves the efficiency and yield of the combination by establishing nested functions and optimizing the combination algorithm. After field test, when the combined speed is controlled within 0.5%/min, the error can be controlled within 0.5% to achieve the desired effect.

Keywords: embedded; combination scale; distributed control; optimization combination

0 引 言

随着国家工业化水平的发展和生产能力的不断提高,食品包装行业正向着机械化、自动化方向发展^[1]。传统的单体称量设备在包装过程中存在速度慢、精度低、稳定性差等缺点,尤其是在称重形状不规则、质量不均匀的物料(如糖果、膨化食品等)时称重误差更大,大大降低了合格率^[2]。而组合秤的出现恰恰弥补了传统定量设备的不足,提高了定量产品包装的速度和精度^[3]。目前组合秤的核心技术依然掌握在少数几个发达国家手中,日本大和生产的 ADW420 系列产品,称重斗数为 20,包装速度高达 240 包/min,定量精度一般在 0.1~1 g,代表着组合秤的世界先进水平^[4]。在国内,唐志祥等^[5]对组合秤进行了介绍和原理分析;刘乘等^[6]通过固定每次参与组合的称重斗的数量,来减少运算量,加快运算速度,但对线振器加料的稳定性要求极高,具

体结果有待验证;邓志辉等^[7]针对物料的差异,做了仿真实验研究,对于不同的物料,选取出最佳组合秤配置和组合算法,具有一定借鉴意义,但是相应地增加了大量的仿真和测试的工作量。因此,为改变这一现状,本文在硬件电路设计和软件组合算法优化的基础上,设计了一种精度高、运算速度快、加料稳定的多头秤控制系统。

1 多头秤的工作原理

目前市面上的组合秤大多是 8 头、10 头、14 头以及 20 头^[8],它们的机械结构基本相同,从上到下分别包括主振器、线振器、存料斗、称重斗、集料斗。其工作流程是首先主控制器采集每个称重单元的质量,经过组合运算后筛选出最佳的下料方式并控制对应的称量斗动作下料;随后待称量斗闭合后,相同编号的存料斗缓缓打开给称重斗补料;最后线振器和主振器同时震动,使物料下落到存料斗中贮存

备用,待采样稳定时间结束以后,再进行下次组合。主控单元在对产品目标质量组合的过程中,理论上 N 个斗会有 2^N-1 种组合方式,一般会根据系统的要求仅使用部分组合。若在某次组合中没有出现合格的组合,那么本次组合会根据用户的设置选择不排料或者强制排放最接近目标质量的超重组来提高设备运行的连贯性。组合秤的工作原理如图1所示。

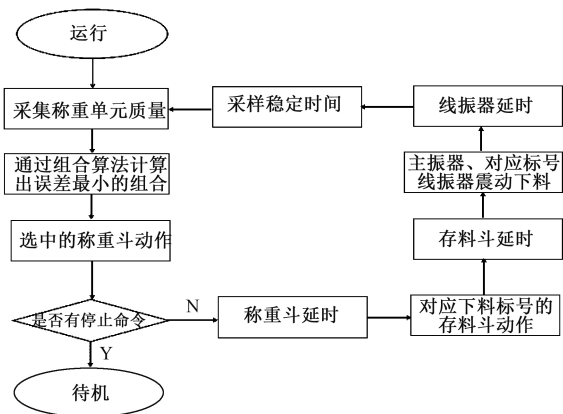


图1 组合秤工作原理

2 系统的整体设计方案

本文采用模块化的设计理念,将整个控制系统划分为若干个不同功能的子模块,同时采用主从集散控制方式将各个模块串联起来^[9]。组合秤的控制系统主要包括主控单元和副控单元,分别选择使用STM32F407VET6和STM32F103C8T6芯片的最小系统作为核心控制电路。其中,主控单元包括中央控制器和通信模块,通过RS485总线与触摸屏连接;副控单元包括A/D数据采集模块、步进电机驱动模块、电磁振荡模块和光电检测模块。主控和副控之间通过RS485总线实现一对多通信,各模块统一由设计在主控模块上的电源模块供电。系统的整体设计框图如图2所示。

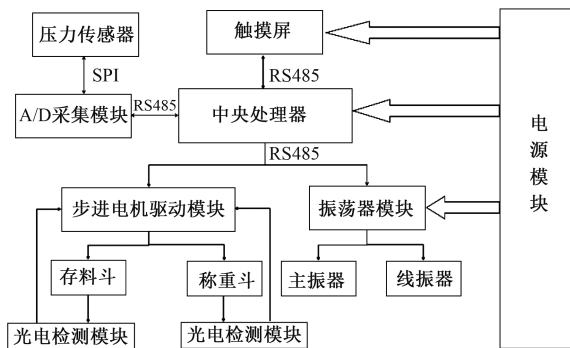


图2 系统整体设计框图

2.1 电源模块

多头秤控制系统的电源模块繁多,为简化电路设计,直流电源模块均设计在主控板上,由主控板统一供电,各电源模块之间相互独立,但电路设计的基本原理相同。

以给主控单元供电的12 V电源为例,CAN通信模块的工作电压是4.5~5.5 V,微处理器STM32F407VET6的工作电压是2.0~3.6 V。系统采用AMS1117-5.0稳压模块将外部12 V直流电源降压到5 V给CAN收发器TJA1050D供电。采用AMS1117-3.3将5 V电源降压为3.3 V给主控单元的控制芯片供电。为了保证系统工作的稳定性,防止瞬态脉冲和涌浪电压对电路的干扰和破坏,在电源输入端加入了4级保护^[10]。如图3所示,当输入端瞬态脉冲过高时,由于电路保护器件的电气特性和时间特性各不相同,瞬态抑制二极管5KP12CA、压敏电阻14D121K以及陶瓷放电管3RM090L-6会随着涌浪电压的增大依次导通形成回路,将输出电压钳制在一个较小的范围内,保护后面的敏感元器件。若此时电压继续上升,达到自恢复保险丝BK30-185的最大工作电压30 V,则保险丝关断,将输入电源与主控电路隔离开来,从而完成对电路的保护。此外,为防止各电源模块的高频电磁波互相干扰,在电路末端加入了共模电感电路,稳定电源输出。12 V电源模块的原理图如图3所示。

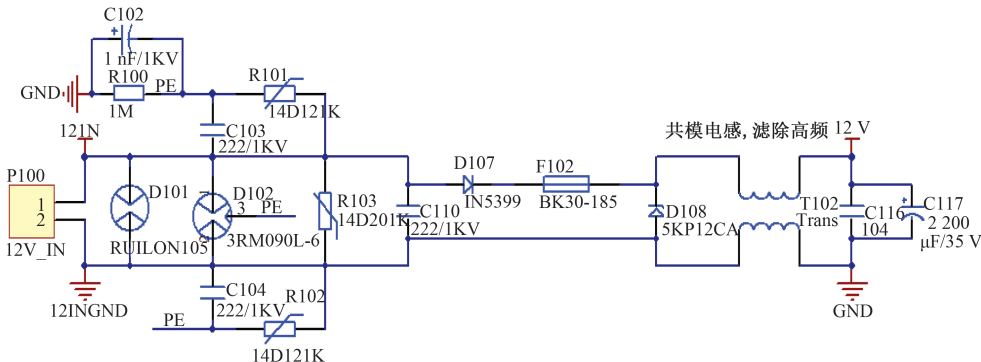


图3 12 V电源模块原理图

2.2 主控单元

在本文中,主控单元分为中央控制和通信两个部分。中央控制部分作为整个控制系统的指令中枢,负责组合算法的运算和协调整个机器的合理运转。以 14 头为例,速度要求为 60 包/min。这就要求中央处理器要在 1 s 的时间内完成对所有称重单元的数据采集,组合算法进行最多 $2^{14}-1=16\ 383$ 次组合运算,并根据参数设置选择出最佳的下料方式,控制对应的振荡器震动以及存料斗、称量斗动作,同时将下料信号下发到包装机并将称重信息上传到触摸屏上显示。在此期间,还需要接收上料机要求上料和包装机请求下料的中断请求信号。要完成这一系列的工作,对核心控制芯片的运行速度和稳定性提出了更高的要求。因此,系统选用意法半导体公司(ST)生产的一款低功耗、中断延时时间短、运行可靠的增强型 STM32F407VET6 芯片^[11]作为主控单元的中央处理器。该芯片内置单精度浮点运算单元,具有多达 7 重 AHB 总线,其工作频率可达 168 MHz^[12],大大提高了代码执行效率,减少了主控组合算法程序的执行时间。另外,该芯片还具有 17 个定时器,多达 15 个通信接口以及丰富的外设接口,为主控单元和副控单元以提供多种通信方式,提高了控制系统的灵活性和兼容性,便于后续产品的开发。

在通信方面,选择 RS485 总线实现主控与副控之间的通信。RS485 通信速率快、带负载能力强,能够有效抑制共模干扰,且各负载之间相互独立工作,大大降低了副控单元的故障影响率。基于 RS485 总线的需要,选用 SP3485 芯片作为通信芯片,该芯片在通信的距离和速度上有很好的表现,接收输入具有真正的失效保护功能,能够有效提高通信模块的安全性和稳定性。

2.3 A/D 数据采集模块

A/D 数据采集模块的工作原理是将压力传感器输出的模拟量信号经过差分运放电路放大后由 A/D 转换芯片转换成数字量信号,供控制芯片使用^[13]。其电路设计的合理性将会直接影响到称重单元的精度,对最终的定量结果起关键作用。系统选用美国 Cirrus Logic 公司的 24 位 CS5532 芯片作为 A/D 转换芯片,相比于其他同类芯片,该芯片具有成本低、集成度高、响应速度快等特点。CS5532 芯片简化了与外围电路的连接,通过 SPI 通信接口可直接与 A/D 控制芯片 STM32F103C8T6 进行数据传递;可编程增益放大器可使放大倍数从 1~32 进行设定,大大提高了系统的动态特性;芯片内部有一个完整的自校正系统,解决了多头秤在长期工作中 A/D 本身存在的零点增益和漂移误差的难题。另外,运放电路芯片选择的是满电源幅度输出双运放的 TLC2272 芯片,该芯片具有输入阻抗高、低噪声的特点,对毫伏级别的输入信号有着较好的线性输出特性。

2.4 步进电机驱动模块

步进电机驱动模块的主要作用是控制存料斗和称重斗的开合下料,其工作原理是按步驱动。步进电机通过电

机驱动电路,接收控制器部分发送的脉冲信号,控制器每发送一个脉冲,步进电机就会按照设定方向随之转动一个固定角度。因此脉冲发送的频率和个数也决定了电机转动的速度和角度^[14]。系统选用的二相步进电机为39BYG,其驱动模块选用芯片TB6560AHQ,该芯片集成度很高,外围电路极其简单,通过设置固定引脚的电平状态即可完成芯片的初始化设置,适合嵌入式系统的开发;自带2、8、16细分可选,在本模块中选用的8分频,即步进电机旋转一圈需要1600个脉冲,8分频也满足步进电机每分钟从几转到几百转的应用要求;芯片的散热面积使驱动器发热少,降低了驱动器因长期工作过热烧坏芯片的风险。另外,控制芯片选用STM32F103C8T6,负责与主控单元通信并发送脉冲信号。由于控制芯片和驱动芯片的工作电压不同,中间接一个74HC140反相器起电压匹配的作用。

3 组合算法的研究

3.1 组合算法的描述

在组合算法的设计上,为了提高产品的包装精度,系统会在多个满足误差要求的组合中进行比较,从中选择误差最小的下料方式,而比较的次数就叫做“优化次数”。根据选中组合斗个数的不同,系统将每组斗的组合过程封装成一个个含 for 循环的嵌套函数(n 个头就有 n 个封装函数)。当一个嵌套函数的所有组合执行完毕后,选择误差最小的一组作为本组的结果。如果没有达到“优化次数”则继续调用下一个嵌套函数,直到达到“优化次数”,跳出循环。最后通过比较每个嵌套函数的组合结果,选择最接近目标值的下料方式。本文以 14 头为例,选择 2 个斗的单元进行组合,目标质量为 100 g,误差为 0.5 g,介绍嵌套函数的构建。其中 goal、weigh 分别表示目标质量和组合质量, m 、 n 表示组合编号; x 、 y 表示选中组合编号;min 表示最小误差,嵌套函数的程序流程如图 4 所示。

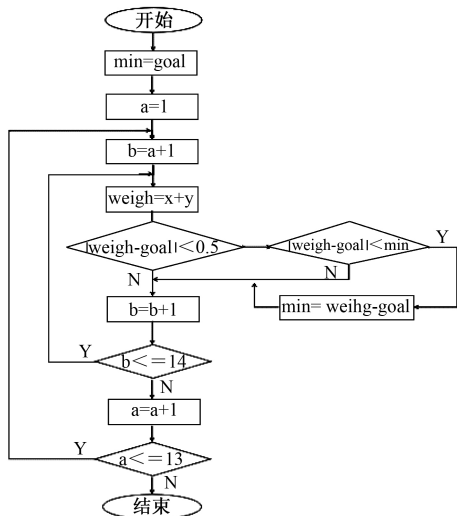


图 4 嵌套函数程序流程

根据相关研究表明,以14头组合秤为例,当组合斗数为4时,出现合格组合的概率最大且更好地适应加料标准差的变化^[15]。因此在每次组合结束后,系统都会根据本次组合的结果适当调整线振器的震动幅度,进而改变下次下料的重量,尽量把下料斗数控制在4个左右。

3.2 优化算法的实现

整个主控组合算法的流程如图5所示,系统在进行组合之前,首先根据上次组合下料的情况以及本次称重的结果确定各称重斗的状态。特殊状态的称重斗包括用户设置不参与组合的禁止斗,单斗质量小于目标重量特定百分比(一般为15%)的超轻斗,单斗质量大于目标质量的超重斗,刚完成置零动作的置零斗,多次组合未被选中的强制组合斗以及采集数据出现错误的故障斗等。除去这些特殊状态的斗,剩余的便是参与本次组合的斗。主控程序根据称重单元的重量先将参与组合斗的平均单斗质量求出来,然后根据设定的目标重量计算出理论组合斗数,通过四舍五入的方法先从理论组合斗数开始组合,调用相应的封装函数。组合结束后如果没有符合目标重量期望偏差范围的组合,则会以该斗数为中心左右延伸,依次调用不同斗数的嵌套函数,直到找出满足要求的组合。比如,若

设定的目标重量为200 g,求出的单斗平均质量为38 g,那么理论组合斗数则为 $200/38=5.3$ 个,根据四舍五入的方法,系统会优先选择5个斗进行组合,若组合结束后没有找到满足要求的组合,则从6、4、7、3……依次向两边延伸进行组合,直到找出满足要求的组合。这样从理论组合斗数出发,改变了传统算法从小到大顺序组合的方法,降低了组合算法的时间复杂度,大大提高了系统组合的效率。如果组合的过程中达到“优化次数”或者所有斗组合完成后“优化次数”不为0,则证明本次组合结果合格,主控单元会发送指令控制选中的称量斗动作,并根据下料的斗数调整线振器的震动幅度,控制下次线振器补料的重量。如果所有组合结束后“优化次数”仍然为0,则证明本次组合结果不合格,此时如果有超重的组合,则根据系统设置判断是否排放与目标重量期望误差最小的超重组合。无论是排放合格组合的物料还是不合格的超重废料,只要本次组合中有称重斗动作,就必须更新对应动作斗的状态,以防止单斗长时间未进行置零或者未参与组合而影响系统整体的精度和速度。通过对组合算法的优化,实现了对组合结果多处理的方式,一方面减少了组合的次数,提高了组合的效率,另一方面使系统组合的合格率大大增加。

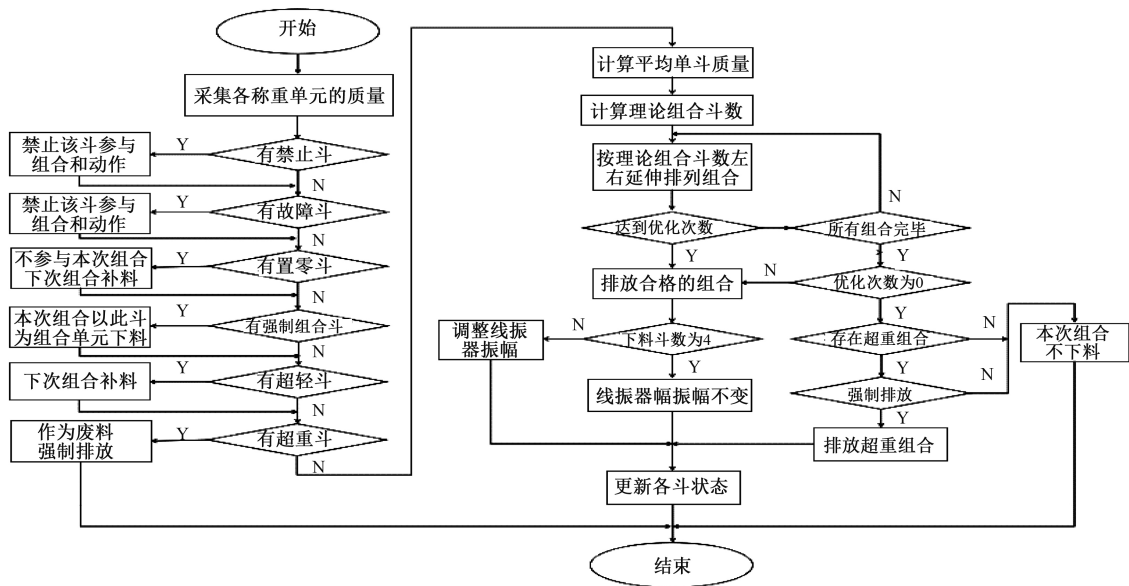


图5 主控算法控制流程

4 称重精度的验证

在工业现场本文以定量包装常用的花生为原料,用量程为2 500 g、分度值为0.001 g的电子天平对下料的组合进行称重后备用,标注其重量值,用于对比组合称重误差。目标重量分别设置为100、200、300、500 g,偏差值为5 g,对组合结果做了数据统计,实验数据如表1所示。

在上述实验的时间设定上,副控单元接收到的控制命令的等待时间约为8 ms;主振器和线振器的振荡延时时间

为200 ms;步进电机带动料斗的开启、闭合及中间停顿过程所用的时间为250 ms;采样稳定时间一般取350 ms,但是考虑到这个时间是与振荡器延时时间同时计时,则实际单独的稳定时间就是150 ms;数据采集时间大约为50 ms;系统最大组合次数可达16 383次,经过多次实验测试得知每次组合大约需要5 μ s,则总的组合时间约为1~82 ms,由于本文对系统的组合算法进行了优化,减少了其他不必要的组合工作,可以将组合时间控制在20 ms之内。根据上述每个环节所需时间推算出组合一次的时间大约为

表 1 现场实验测试结果

序号	天平称重/g	实测值/g
1	100.724	100.7
2	100.535	100.6
3	99.743	99.9
4	100.545	100.6
5	100.043	100.2
6	200.441	200.5
7	199.841	199.5
8	200.354	199.9
9	199.945	200.0
10	200.133	200.3
11	300.178	300.3
12	299.864	300.1
13	300.534	300.5
14	300.286	299.9
15	300.124	299.8
16	500.664	500.9
17	500.311	500.8
18	499.624	500.2
19	499.843	500.4
20	500.264	500.5

928 ms,即组合速度大约 65 包/min。

综上所述,由实验结果可知,当组合速度达到 65 包/min 时,目标重量为 0~200 g 时组合平均误差在±0.5 g 范围内,目标重量为 200~500 g 时组合平均误差在±1 g 范围内,满足生产要求。

5 结 论

本文设计的基于 STM32 的嵌入式多头秤控制系统成本低、体积小。通过对组合算法的优化,不仅减少了组合次数,而且弥补了传统的固定每次参与组合的称重斗的数量而过分依赖加料稳定性方式的不足。在参数配置方面,根据组合结果调整参数有利于实现称重不同物料之间的自动切换,相对于传统的设备在配置不同物料参数之前的大量测试工作,本文系统大大减少了工作量,提高了设备的下料的稳定性和运行的流畅度。通过现场的测试,系统的速度和精度都能达到预期要求,能够有效提高中小型

包装企业生产效率。

参考文献

[1] 刘方全.定量包装技术的发展方向[J].中国计量,1999,40(3):37-38.

[2] 郭鹏,孙宏强,杨彦彬,等.新型多头秤控制系统设计[J].石家庄学院学报,2012,14(3):32-34,82.

[3] 彭福红,任作新.高精度电脑组合秤控制系统的设计[J].机械工程与自动化,2007(6):127-129.

[4] 权小青.我国智能组合秤市场发展分析[J].衡器,2012,41(12):1-3.

[5] 唐志祥.包装计量组合秤工作原理初探[J].广东工业大学学报,1994(1):45-52.

[6] 刘乘,李彩娟,沈训乐.组合秤仿真及优化研究[J].包装工程,2011,32(3):53-56,59.

[7] 邓志辉,张西良,刘剑敏,等.组合秤组合模型对定量误差影响研究[J].机械设计与制造,2006(3):108-110.

[8] 王雪丹,钱静.组合称量思想在单包装件组合计量上的应用[J].包装工程,2017,38(1):42-46.

[9] 余勃,崔劼,宋迎法,等.组合秤包装生产线分布式监控系统的设计[J].包装工程,2009,30(7):47-49.

[10] 赵鹏,荆红莉.多输出直流稳压源设计与实现[J].国外电子测量技术,2012,31(2):84-86.

[11] 董锦旗,郝晓红.基于 STM32F407 扩展卡尔曼软启动器设计和实现[J].制造业自动化,2017,39(9):15-18.

[12] 张团善,肖磊,张娜.基于 STM32 和 FPGA 的多轴运动控制器的设计[J].电子测量技术,2011,34(5):61-63,67.

[13] 唐立军,滕召胜,陈良柱,等.电子秤倾角自动检测与称量误差补偿方法研究[J].电子测量与仪器学报,2011,25(1):61-67.

[14] 王沁,徐科军,姜鹏,等.具有反向 PWM 的阀门定位器控制方法及实现[J].仪器仪表学报,2011,32(9):2016-2023.

[15] 胡家盈.电磁振动给料装置自调节控制的 Simulink 仿真[J].机械,2016,43(8):6-10.

作者简介

安世奇,博士、教授,主要研究方向为控制理论与应用、过程控制、嵌入式控制系统、智能仪器仪表。

孙瑞,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与应用。
E-mail:369767354@qq.com