

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802081

色选机喂料振动器的FPGA控制方法与实现^{*}刘 群¹ 洪占勇¹ 贾星明²

(1.合肥工业大学 工业与装备技术研究院 合肥 230009; 2.安徽中科光电色选机械有限公司 合肥 230012)

摘 要: 针对传统色选机喂料振动器不能有效解决电网电压波动造成的振动量非线性变化和指令与控制信号不同步的问题,提出了一种基于FPGA的色选机喂料器振动控制方法,该方法基于Verilog HDL语言和多个子模块,通过配置PWM参数实现晶闸管导通延迟设计,实现振动量大小的同步调节。通过仿真和波形检测表明,该方法能够有效实现控制信号与发送指令同步;通过现场的振动测试表明,该方法能实现振动加速度随振动量输入值线性变化,空载条件下二者线性拟合度达0.95,在下料情况下,振动输入值较大时线性拟合度可达0.99。

关键词: 色选机振动器;PWM控制;FPGA;晶闸管

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

FPGA control method and implementation of feed vibrator in color sorter

Liu Qun¹ Hong Zhanyong¹ Jia Xingming²

(1. Institute of Industry & Equipment Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Zhongke Optical-electronic Color Sorter Machinery Co., Ltd., Hefei 230012, China)

Abstract: Due to the traditional feeding vibrator of color sorter could not effectively solve the problem of non-linear variation of vibration and cannot synchronizing command signal and control signal caused by voltage fluctuation of power grid, a method for vibration control of feeding vibrator of color sorter based on FPGA is proposed. This method is based on Verilog HDL language and multiple submodules. The PWM parameter is configured to realize the thyristor turn-on delay design and realize synchronous adjustment of vibration volume. Simulation and waveform detection show that this method can effectively synchronize the control signal with the sending instruction; through the filed vibration tests shows that this method can realize linear vibration acceleration with the vibration magnitude of the input value change, under no-load condition, the linear fitting degree reaches to 0.95, under the feeding condition and large vibration input, the linear fitting degree can reach to 0.99.

Keywords: color sorting vibrator; PWM control; FPGA; thyristor

0 引 言

色选机是利用光电原理将大量散装产品中的颜色异常或感染病虫害的个体以及外来杂质进行检测并分离的设备^[1]。喂料振动器是色选机的重要组成部分,其利用电磁原理,以一定频率的振动将物料均匀分散到滑槽上以便进一步处理,因此振动器对整个色选机的产量、色选精度和整机能耗方面有着重要影响^[2]。

多数色选机厂家采用单片机作为振动器电路的控制核心,这种方法简单易行、成本较低。但在实际工业应用中,由于受到电网电压的频繁波动和物料重量突然变化等多重因素的影响^[3],喂料器振幅会发生较大的变化,并且严重偏

离预定的线性变化的目标,进一步导致物料下落速度不稳定,下落量不均匀。在这种情况下,基于单片机的振动器控制系统不能有效解决问题,导致色选机色选精度和产量受到极大地影响。

为了控制振动器均匀稳定地下料,根据实际色选机喂料振动器模型以及光耦合器和晶闸管特性,本文设计了一种基于FPGA的色选机喂料振动器的控制方法,通过FPGA产生多路占空比和相位均任意可调的PWM波输出,并利用FPGA并行处理实现输出信号与命令信号的高度同步,保证控制信号的稳定。最后进行信号波形的仿真和测试,同时在色选机振动器上进行振动加速度测量和下料效果的测试,验证了本方案的可行性。

收稿日期:2018-08-27

^{*} 基金项目:安徽省科技厅秋实计划项目(2013AKKG0392)资助

1 色选机振动器结构与振动控制原理

1.1 色选机喂料振动器结构及工作原理

喂料器以振动的方式控制着色选机的物料输入。如图 1 所示,喂料器主要由料斗、弹片、电磁线圈、衔铁、底盘和隔振弹簧组成,料斗开口向下倾斜,并与水平方向成一定夹角^[2,4]。

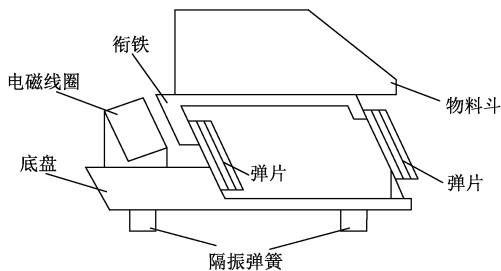


图 1 色选机喂料振动器结构

振动器上电后,电流经过电磁线圈后使线圈产生一定的磁场,因此会在电磁线圈和衔铁之间产生电磁吸引力,使弹片产生形变并存储弹性势能;断电后,电磁线圈中的电流消失,导致线圈失去电磁吸引力,衔铁离开线圈,存储一定弹性势能的弹片则会向反方向振动。在一定频率的电流下,弹片朝两个反方向来回往复运动,使物料槽不断中的物料向开口处滑动,最后落到物料槽上,完成喂料功能^[2,4-5]。

1.2 基于光耦隔离的晶闸管脉冲触发振动控制电路

振动器的振动是通过衔铁与电磁线圈间磁力通断来实现的。在各种工控现场,信号传输容易受到外界各种电磁噪声的影响而产生畸变。为了提高系统的抗干扰性能,保证振动器安全稳定地工作,采用较为可靠的光耦合器对振动器及现场强电部分隔离^[6]。

如图 2(a)所示,光耦合器主要由发光二极管 D 和光接收三极管 T 组成,当输入端 V_i 为低电平信号时,发光二极管 D 导通,光接收三极管 T 的基极感应到光并产生基极电流,使三极管的集电极和发射极导通,产生输出信号 V_o ;当输入端 V_i 为高电平信号时,发光二极管 D 截止,光接收三极管 T 感应不到光信号,因此 T 处于关断状态,不产生输出。这种利用光耦合器件进行信号的传输方法能够有效实现信号的隔离和抗干扰^[7]。

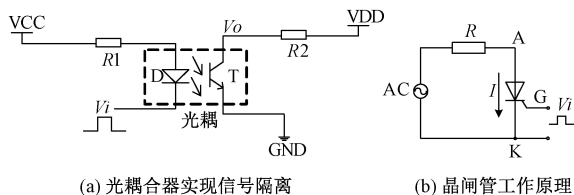


图 2 光耦合器与晶闸管

为了实现振动量大小的调节,工业上大多使用了可控硅即晶闸管器件,其中晶闸管导通角的应用起到了决定性的作用,通过调节晶闸管导通时刻的相位实现控制输出^[8]。如图 2(b)所示,当阳极 A 加正电压且门极 G 有电流经过时,晶闸管导通,只有当阳极电流降低到 0 时,晶闸管才会关断,因此可以通过控制门极脉冲与每个正向周期起始时刻的延迟时间,实现晶闸管的触发和导通时间的控制^[9]。

基于光耦合器和晶闸管电路,采用移相触发来实现振动器开关和振动量的控制是一种较为灵活有效的方法,本文采用 PWM 输出工作的方式作为晶闸管触发脉冲的控制命令输出。通过内部运算输出一定占空比的 PWM 波,经滤波后获得直流电压送至晶闸管触发脉冲模块,作为触发晶闸管导通角的控制命令,由于该电压正比于 PWM 波的占空比^[10],因此可通过单片机或 FPGA 等方式进行晶闸管导通时间的调节,从而实现振动量大小的控制。图 3 所示为利用 PWM 设置晶闸管导通时间原理,晶闸管驱动电路的控制信号是低电平有效,以一个周期的正弦信号为例,在交流信号的过零点 t_1 之后设置 PWM 下降沿以及下一过零点 t_2 后设置上升沿,这段时间用于晶闸管导通和反向维持,如阴影部分所示。上升沿之后的高电平使得晶闸管断开,从而使得晶闸管以一定的频率通断,使振动器进行工作。此外,根据振动器工作频率,可选择合适的脉冲电源进行匹配,以达到更好的振动效果^[11]。

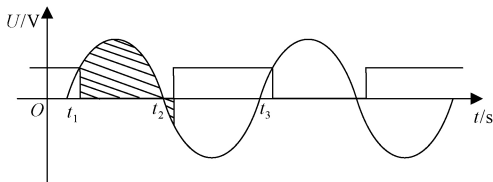


图 3 PWM 实现晶闸管导通时间调节的原理

在控制振动量大小,可通过改变控制信号 PWM 波的低电平占空比即可改变振动器振动量^[12]。因此,晶闸管导通时间、导通角和 PWM 之间存在以下关系:

$$\frac{t_{on}}{T_1} \propto \frac{t_L}{T} \quad (1)$$

$$\frac{t_{on}}{T_1} \propto \frac{\alpha}{2\pi} \quad (2)$$

式中: t_{on} 为晶闸管工作一次的连续导通时间; T_1 为晶闸管最大导通时间; t_L 为一个周期内 PWM 的低电平时间; T 为 PWM 波的周期; α 为晶闸管导通角($0 < \alpha \leq 2\pi$)。

2 基于 FPGA 的振动控制系统设计

图 4 所示为以 FPGA 为控制核心组成的色选机振动器系统原理框图,其主要包括市电过零检测模块、振动驱动模块和 FPGA 逻辑模块。

此外,外部有源晶振为 FPGA 提供 40 M 的驱动时钟;电源模块利用 DC-DC 和 LDO 将开关电源转换后的 24 V

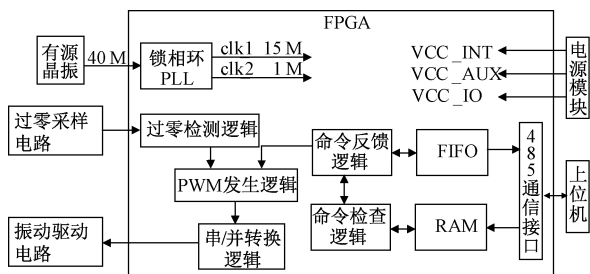


图 4 基于 FPGA 的色选机喂料振动器系统设计

电压转换成各个模块所需要的输入电压;485 总线通信接口实现 FPGA 和上位机之间的通信,完成指令的闭环传输和控制。

2.1 市电过零检测模块

由于晶闸管采用移相触发控制,其触发信号应以同步电压信号为基准延迟一定的相位角,因此采用同步电压过零检测进行控制信号的同步^[10]。

市电过零采样检测原理如图 5 所示。采用变压器 T1 对 220 V 市电进行隔离降压,使交流信号适用于采样电路,在此过程中,变压器输出的 12 V 交流信号相对于原信号存在 180° 的相位偏移,之后通过两个并联的反向齐纳二极管 D1 和 D2,由于受到齐纳二极管反向击穿电压限制的作用,交流信号会被转换为方波信号,通过运算放大器 U1 进行信号放大后,被 FPGA 采样端口 VCC_AD 进行电压采样,通过检测转换后方波的边沿即可获得市电每个周期的零点时刻信息,FPGA 以此零点位为参考产生一定占空比的 PWM 控制信号。

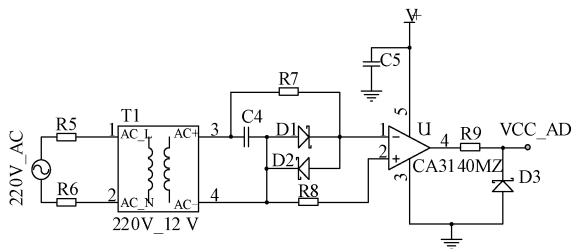


图 5 市电过零采样电路

2.2 振动驱动模块

振动驱动模块电路由光耦合器器件和双向晶闸管组成,通过控制晶闸管的状态来控制电磁线圈中电流的通断,从而控制振动器正常有序工作,通过 PWM 控制晶闸管导通角来改变每个周期的电源通断时间,实现振动器振动量大小的控制。

本设计采用双向晶闸管进行触发导通,晶闸管工作在 I+ 模式下^[8],通过控制 PWM 波占空比实现晶闸管的导通时间。振动驱动电路原理如图 6 所示。光耦合器 U2 采用 MOC3021 芯片,双向晶闸管 Q 采用 BTA24-800B 器件,内部最大电流为 10 mA。通过光耦合器的信号隔离和晶闸管

设置导通时间触发,实现振动器振动参数可调功能,使振动器产生一定幅度的振动。

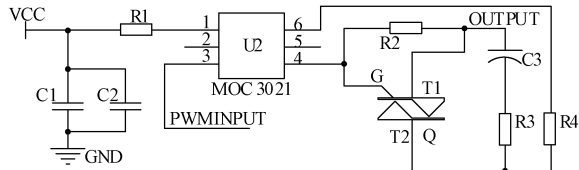


图 6 振动驱动电路

2.3 FPGA 逻辑模块

FPGA 逻辑模块是整个控制系统的核心,使用 Verilog HDL 硬件描述语言编写。基于模块化、标准化的设计思想,将外部总线转化为内部总线,以功能为单位实现各个模块的设计^[13]。本设计主要逻辑模块的顶层文件设计框图如图 7 所示。

1) 时钟同步模块

FPGA 内部采用锁相环(PLL)实现时钟同步。锁相环 IP 核是生成输入时钟的闭环频率控制系统,它比较输入信号和压控振荡器(VCO)输出信号之间的相位差并实现相位同步,从而在输入或参考信号的频率上保持固定的相位角,配置所需要的同步时钟^[14]。如图 4 所示,外部晶振产生 40 MHz 的时钟信号,经过 FPGA 的锁相环 IP 核进行分频,分别配置两路时钟 clk_1 和 clk_2,clk_1 为主时钟,其频率为 15.36 MHz,用于 FPGA 内部各个模块;clk_2 的频率为 1 MHz,用于外部检测使用。

2) 指令存储模块

为了确保上位机与振动系统能够准确无误地通信,本系统配置了基于双端口 RAM 和 FIFO 的 IP 核。双端口 RAM 支持混合位宽数据读写,FIFO 用于先进先出的数据流缓存^[14]。如图 7 所示,本设计中双端口 RAM 执行命令检查,采用“包头检查+异或校验+包尾检查”命令串对上位机指令进行检测和提取,并写入 RAM 中;命令检查无误后,由 FIFO 将传输状态进行缓存,并在指令传输完成后返回给上位机,确认无误后进行后续操作。

3) PWM 波发生模块

基于 FPGA 的 PWM 信号产生原理如图 8 所示,通过数据存储、时钟计数和数据比较设置死区逻辑参数,得出相应的 PWM 信号^[15]。

计数单元用于晶闸管触发相位延时计数。本文设计晶闸管的触发相位延迟角 α 处于 0~180° 之间,在 FPGA 中以 8 位二进制数给出,那么这 8 位二进制数 D 与触发延迟角 α 的关系为:

$$\alpha = \frac{D}{256} \times 180^\circ \quad (3)$$

若 FPGA 定时计数器计数脉冲周期为 T_s ,内部定时计数器测量的同步信号周期计数值为 T_m ,即 360° 角对应计数值为 T_m ,则在相同的定时计数周期下,根据式(3)得出的触发延迟角 α 对应的计数值 T_N 为式(4)。

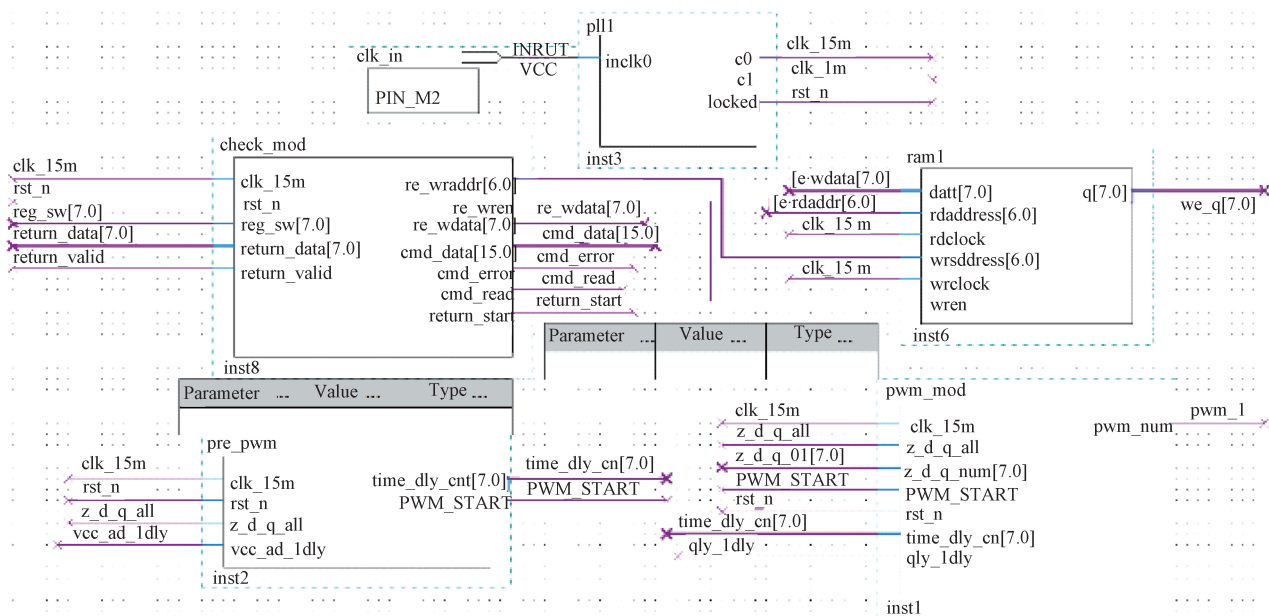


图 7 FPGA 顶层文件

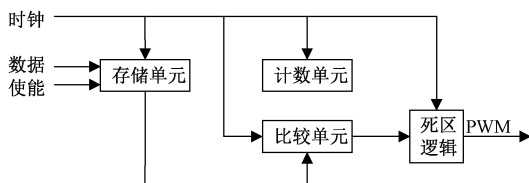


图 8 利用 FPGA 产生 PWM 信号的原理

$$T_N = \frac{DT_m}{512} \quad (4)$$

将式(4)计算的定时计数值换算成定时初始值写入定时器后,在市电信号的零点启动定时工作,定时溢出时输出触发脉冲,即可获得所需的脉冲延迟相位^[10]。

比较单元通过设定比较寄存器的值来改变 PWM 波的占空比,其接收来自计数单元的计数值,根据比较结果产生不同的输出信号^[16]。在计时比较完成后,有死区逻辑设置一定的死区时间,通过对输入的计数信号进行边沿控制与否,输出互补或独立的多路 PWM 信号供选择使用,同时也避免因瞬间电流过大损坏功率器件的现象^[16-17]。

3 实验仿真与振动测试分析

3.1 波形仿真

本设计采用 Altera 公司 Cyclone 系列的 EP4CE6F17C8N 器件,使用 QuartusII 15.1 的 Signal Tap II 运算分析器进行仿真运算,将振动量设置成 100 时进行仿真,得到如图 9 所示前 1 024 个时钟的仿真波形。

由图 9 可知,8 位串口数据 rx_tx 进行 PWM 计时使用,用于调节 PWM 波的占空比以进行晶闸管的导通时间

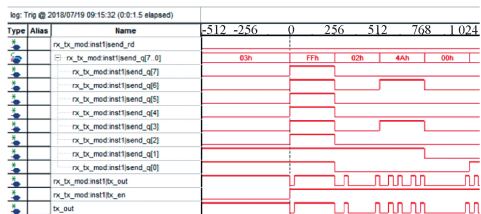


图 9 振动量为 100 时波形仿真

的设置,实现振动物量大小的调整。在运行之初,输出 tx_out 相对输送数据有一定的延迟,用以触发晶闸管相位延迟角,从而实现晶闸管延迟触发模式。

3.2 振动波形检测

如图 10 所示,将 220 V 市电通过变压器连接示波器的 1 通道,将振动驱动电路上关键节点连接到示波器的 2 通道,测试市电波形、过零采样波形和晶闸管输出波形。

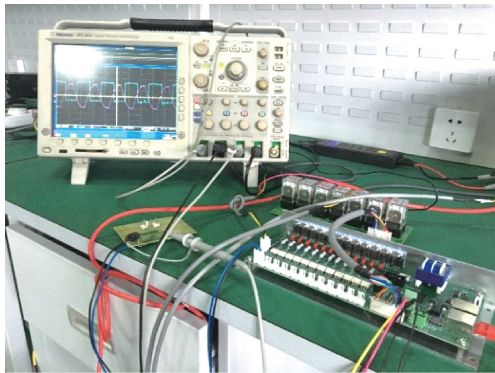
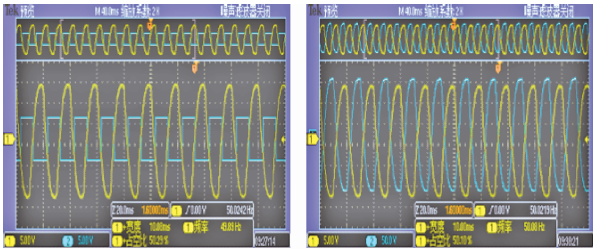


图 10 振动控制系统实验测试平台

图 11(a)所示为示波器检测到过零采样点 VCC_AD 的与市电的比对波形,图中方波为 VCC_AD 即晶闸管驱动控制采样信号,正弦波为市电交流输入信号。可以看出,晶闸管控制信号的每个下降沿都在实际市电的过零点之后,保持一定的延迟后,同一周期内晶闸管控制信号的上升沿在同一周期内实际市电的下一过零点之后,从而维持晶闸管反向电压下的继续导通状态并控制振动量。当控制信号为高电平时,晶闸管断开,保证电磁线圈内出现一定频率通断的电流。



(a)市电过零采样电压波形
(b)晶闸管输出电压波形
图 11 示波器波形检测

为了进行区分比对,将控制信号波形振幅放大,得出如图 11(b)所示的晶闸管输出信号与市电波形比对图,控制信号相对于市电有 180°的相位翻转,表示晶闸管驱动控制信号是低电平有效,并大致与市电输入信号同步。

3.3 振动器振动加速度测量与方案验证

为了验证本方法设计的振动器振动量是否线性变化,在供电电压为 220 V,频率为 50 Hz 的市电条件下,分别通过调节上位机面板上的振动量值,测量空载和下料(大米)条件下不同的振动量大小的振动加速度。

实验中上位机面板上的振动量大小范围为 1~100,取间隔为 10 的振动量依次进行加速度测量。使用 VC63 型加速计测量振动器空载条件下的 4 次振动加速度值,如表 1 所示。下料时,测量振动器振动加速度值和色选产量,结果如表 2 所示。

表 1 不同振动量下振动器的振动加速度测量值					
振动量大小 (面板值)	振动器振动加速度测量值/(m·s ⁻²)				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	均值
10	0.3	0.2	0.3	0.3	0.275
20	0.9	1.2	1.0	0.9	1.0
30	2.6	2.9	3.0	2.8	2.825
40	7.1	6.6	7.2	7.0	6.925
50	16.4	16.4	16.2	16.0	16.25
60	21.0	21.3	21.5	21.8	21.4
70	24.0	24.3	24.1	24.2	24.15
80	28.7	27.9	28.0	27.9	28.125
90	28.2	29.9	29.2	28.9	29.05
100	31.6	32.1	32.2	32.3	32.05

表 2 下料状态下振动加速度和色选产量测量值		
振动量大小 (面板值)	振动加速度/ (m·s ⁻²)	色选产量/ (t·h ⁻¹)
50	8.9	0.20
60	12.5	0.36
70	16.7	0.68
80	22.6	1.19
90	28.6	1.86
100	32.3	2.58

表 1 中,设振动量大小为 x (无量纲),振动加速度均值为 y (m/s²),采用线性拟合的方法^[18],计算线性拟合系数 r ,如下所示:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{5}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \tag{6}$$

$$r = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{7}$$

将 $n=10$ 和表 1 数据代入计算得: $r=0.95$,此拟合系数接近于 1,说明线性拟合效果好。因此在空载状态下,振动器振动加速度与振动量成线性拟合关系。

由表 2 数据和式(5)~(7)计算振动加速度线性拟合度得 $r=0.99$,因此可以得出在下料情况下,振动量在 50~100 之间时振动器振动加速度随振动量线性增加,且在振动量较大时可基本满足色选规定的产量值。

然而在振动量较低时,可以看出振动加速度和产量下降较快,可能是机械设计和其他方面的原因造成的加速度低、色选产量小的问题。因此,如何在振动量较小时解决色选产量过低的问题,是本文尚待解决的难题。

4 结 论

本文研究了基于 FPGA 的色选机喂料振动器驱动控制的设计,在采用交流市电的基础上,改进使用光耦隔离和双向晶闸管进行控制,通过 FPGA 设置 PWM 参数实现晶闸管脉冲触发延迟的控制,结合过零采样模块共同实现振动量大小与上位机命令的同步控制。仿真和波形检测表明,本方法可实现晶闸管触发延迟的设定,达到控制命令与控制执行在时序和相对幅度上高度同步的效果。振动加速度和色选产量的测试表明,空载条件下,振动量可随上位机命令大致进行线性同步变化;但在下料状态下,振动量较低会影响下料。在后续工作中,可通过改进喂料器的机械结构、优化振动电路的设计进行调整,最终可实现下料状态下振动器振动量和色选产量的线性变化,达到较好的色选效果。

参考文献

- [1] 秦锋,阮竞兰.谷物色选机国内外现状及发展趋势[J].粮食加工,2011,36(2):51-53.
- [2] 付理祥.色选机下料振动器幅频调节控制的研究[D].厦门:华侨大学,2013.
- [3] 付理祥,郑力新,樊辉.色选机喂料器振幅和产量控制的研究[J].微型机与应用,2012,31(24):80-83.
- [4] SHEN Y H, SU J, LIU Y, YANG Z G. Design of a new piezoelectric vibrating feeder [C]. Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering II, 2014:1605-1611.
- [5] 闻邦椿,刘树英.现代振动筛分技术及设备设计[M].北京:冶金工业出版社,2013.
- [6] 张永锋,孙晓凌,周国顺.光耦隔离晶闸管交流调压电路过触发现象研究[J].电气传动自动化,2014,36(6):6-9.
- [7] 方大千,郑鹏,朱征涛.晶闸管实用电路详解[M].上海:上海科学技术出版社,2012.
- [8] 郝浩,李宏.基于单片机的晶闸管触发器的设计[J].电子设计工程,2009,17(2):62-63,66.
- [9] 西多奥·威尔迪.潘再平,杨莉(译).电机、拖动及电力系统[M].第6版.北京:机械工业出版社,2014.
- [10] 谢运祥,欧阳森.电力电子单片机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [11] 王兴贵,宁俊保,卢耀文.用于电磁振动器的脉冲电源研究[J].电力电子技术,2012,46(11):87-89.
- [12] 艾瑞克·孟麦森.冬雷(译).电力电子变换器:PWM策略与电流控制技术[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [13] 张松,李筠.FPGA 的模块化设计方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(5):560-565.
- [14] 刘东华.Altera 系列 FPGA 芯片 IP 核详解[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [15] 孔德杰,宋悦铭,毛大鹏.高精度中频双极性 PWM 信号发生器的 FPGA 实现[J].国外电子测量技术,2015,34(11):32-34,43.
- [16] 查国翔,马勇,王聪.基于 FPGA 的 PWM 波形发生器的设计[J].煤炭工程,2016,48(8):135-137,140.
- [17] 苏荣锋,许瑞年,黄毛毛.基于 FPGA 生成 PWM 波的实现[J].核技术,2012,35(6):423-427.
- [18] 费业泰.误差理论与数据处理[M].第6版.北京:机械工业出版社,2014.

作者简介

刘群,1994 年出生,硕士研究生,主要研究方向为网络化测控技术。

E-mail: lukwin2012@mail.hfut.edu.cn

洪占勇,1970 年出生,副教授、硕士生导师,主要研究方向为现代检测技术及仪器智能化、机器视觉与光电检测技术、网络化测量及远程诊断技术。

E-mail: hongzhanyong@126.com