

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.019

# 水肥一体化智能调控设备智能液位开关设计\*

付强<sup>1</sup> 梅树立<sup>2</sup> 李莉<sup>1</sup> 王俊衡<sup>1</sup> 王海华<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 在对设施蔬菜生产中使用的水肥一体化设备进行智能灌溉控制设计中, 监测混肥罐和回液桶中液位高低是非常必要的。现有液位检测普遍采用机械开关式液位浮子, 工程实践中发现当进出水口与浮子过近, 或者水纹波动显著时, 浮子上下剧烈抖动会导致水泵随浮子的抖动而经常启停, 对于启动电流较大的泵容易造成损伤。本文在软硬件设计中采用了计数器数字滤波电路以及单片机定时器中断, 设计了一种替代简单液位浮子的实用智能液位开关。为了检验该设计的性能, 在同等条件下, 进行了不同液面、不同压力和水流量的对比试验。试验结果表明, 计数脉冲发生电路中充电电阻和放电电阻为 4.7 k $\Omega$  时, 滤波后的输出信号比现场实际的数控信号时间迟滞了 2.11 s, 经数字电路滤波后的输出信号已经完全消除了宽度小于 2 s 的所有干扰信号, 并且具有很高的稳定性。延迟时间与计数电路、计数脉冲发生电路有关, 通过电路设计调整滤波脉宽可使输出信号有效地滤除干扰成分。同时, 利用该方法也可以根据不同工况, 如不同功率的水泵设定不同参数滤除干扰信号, 提高智能液位开关适用性。

**关键词:** 水肥智能调控系统 液位浮子 抖动 数字滤波器 智能开关

**中图分类号:** S625.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0108-08

## Intelligent Switcher Design in Water and Fertilizer Integration Equipment

Fu Qiang<sup>1</sup> Mei Shuli<sup>2</sup> Li Li<sup>1</sup> Wang Junheng<sup>1</sup> Wang Haihua<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory on Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Electrical and Information, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** It was necessary to monitor liquid level in both mixing fertilizer tank and recycle tank respectively to design the integrating equipment of water and fertilizer in the intelligent hydroponic control system for facility vegetable production. In practical engineering project, the liquid level floaters are widely used for the existing liquid level detection. The effect of the floaters can be disturbed by some conditions, such as waterlines fluctuation when the floaters were too close to inlet or outlet. Shaking up and down of the floaters result in pump to start and stop intermittently, which will damage the pump with great starting current. To solve these problems, the counter was used to design digital filter circuit and MCU timer interrupt respectively in the hardware and software. In order to test the performance of the new intelligent liquid level switcher, the comparison experiments of different depths, pressures and water flows were carried out under the same conditions. The results show that this method can effectively filter out interfering signal. When both the charging resistance and discharge resistance of the counting pulse generating circuit are 4.7 k $\Omega$ , the filtered signal delayed 2.11 s after the fact output signal. The effective output signal was cleared off disturbing signal under 2 s by digital filter circuit and kept high stability. The delay time is related to the counting and pulse generating circuit, so different disturbing signals can

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-09

\* 国家自然科学基金资助项目(31301240)和土壤植物机器系统国家重点实验室开放课题基金资助项目(2014SKL03)

**作者简介:** 付强, 硕士生, 主要从事精细农业和农业信息化技术研究, E-mail: fuqiang6116@126.com

**通讯作者:** 王海华, 副教授, 博士, 主要从事精细农业系统集成研究, E-mail: whaihua@cau.edu.cn

be declined by configuring filter plus width in circuit design. On the way of software design, timer programming method was used in microcontroller considering width of the wave curve to detect the status of ports at certain intervals. The algorithm was introduced to remove disturbance and improve the efficiency of SCM. The method can be used to filter out the interference signal by setting different values according to the actual situation, such as different power pumps so the smart switch can be more feasible.

**Key words:** Water and fertilizer integration system Liquid level floaters Jitter Digital filter Intelligent switch

## 引言

蔬菜作为高需水需肥作物,水肥一体化是当前设施蔬菜生产的关键技术。相对于我国传统粗放的“肥大水勤”水肥施用方式<sup>[1]</sup>,水肥一体化利用技术是通过灌溉系统施肥浇水,作物在吸收水分的同时吸收养分。因其高效利用、省肥省水、节约成本、使用方便,被欧美等发达国家广泛应用在农业生产中<sup>[2-4]</sup>。

水肥一体化智能调控设备在使用过程中,需要对混肥罐和回液桶中液位进行监控。既保证混合液不能溢出混肥罐或回液桶,同时液位也不能过低,以免发生水泵空转,造成损坏。在水肥一体化智能调控设备的长期实践中液位控制的诸多问题逐渐显现。目前使用的监控方法主要是判断液位浮子的通断来控制水泵的启停。通用的各种液位开关中,机械电缆式液位浮子开关因具有结构坚固、性能稳定、无毒、耐腐蚀、安装方便、价格低廉等优点而在水文站、水位站、水库、水电厂中广泛采用。但是,经过长时间、大范围的实践之后发现,水纹波动和接触抖动等一些不良工况会严重影响设备正常工作。本文以目前水肥一体化设备上使用的液位浮子为例<sup>[5]</sup>,分析其使用中产生的问题与原因,研究提高液位浮子抗波动干扰能力的有效方法。

## 1 液位开关设计

### 1.1 干扰分析

在当前研究的水肥一体化设备中,结构如图1所示。PVC材质的混肥罐长、宽、高分别为41.5 cm、40.0 cm和79.5 cm,灌溉时进水和施肥均使用不锈钢离心泵(粤华牌,型号GZA(S)65-50-160/4.0)提供动力,扬程为32 m,转速2 900 r/min,流量25 m<sup>3</sup>/h,功率4.0 kW。进出PVC水管的直径均为50 mm,同时进水端装有液压表(量程为0.8 MPa,精度0.02 MPa)和水表,用来测量进水压与水流量。在循环管路中安装有DN40活接球阀(内径50 mm),以便通过调节球阀的开闭程度来调节进水压。实验

过程中观察并记录不同液面、不同压力和水流量情况下浮子抖动的状态。

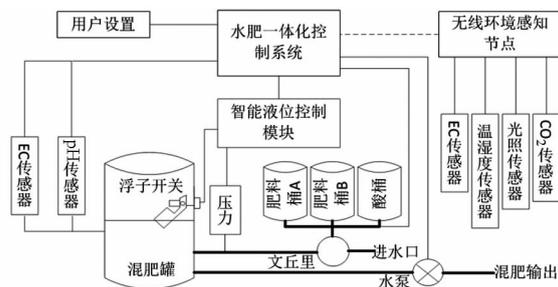


图1 水肥一体化设备结构图

Fig. 1 Structure diagram of water and fertilizer integration equipment

实际灌溉中,水肥一体化设备采用2台功率相同的水泵分别作为进水和施肥的动力。但从试验角度出发,研究采用内循环的方式模拟工作状态,即将混肥罐的进、出水口相连。混肥罐中高处的液位检测通过进水管的隔膜阀连接浮球控制,低液位的检测使用液位浮子,两者协同工作确保液面在正常的范围。液位高过最大值时,浮球抬起,阻断隔膜阀,关闭进水;当液面高于低位浮子时,浮子闭合,抽水泵工作,反之水泵停止工作。混肥罐内空间一般较小,低位浮子距混肥罐底部的高度为8 cm,进水口和出水口的高度分别为8 cm和13 cm,且与浮子的直线距离分别为12 cm和27 cm。过近以及进水冲击容易导致设备在工作时浮子随水流波动而上下闭合,从而使水泵经常启停,对启动电流较大的泵使用寿命影响较大。本文分析的浮子干扰抖动包括:进水冲击引起肥液内部本身剧烈滚动和水纹波动,导致浮子随着肥液抖动;浮子在每次闭合时机械接触产生的数毫秒的持续扰动。后者虽然不易被使用者发现,但在抖动过程中会产生“毛刺”信号,增大接触电阻,降低可靠性,并在瞬间产生比稳态时高几倍的浪涌电流,易造成单片机判断失误甚至是控制失常<sup>[6]</sup>。本文分别从硬件和软件两方面研究抗干扰的措施,并且使用Saleae逻辑分析仪观察浮子信号输出电平。采样频率选择为500 kHz,连续采样50 s,触发设置为下降沿。

## 1.2 液位开关的抗干扰设计

### 1.2.1 毛刺信号的消除

为了检测浮子的开闭状态,设计的电路如图2a<sub>0</sub>进行灌溉时,浮子开关是向上漂浮的,此时输出端口RB的电平为低。灌溉工作结束后,浮子垂直,RB的电平为高。浮子在机械接触的瞬间会有微小的抖动,为了将其消除,将R2电阻换成0.1 μF电容,改进的电路图如图3a所示。拨动浮子,使RB

消除,波形更为平滑,实际应用中消抖效果也比较明显。

### 1.2.2 硬件设计与仿真

经过大量的测试后发现,水压与流量正常工作的条件下,液面高度在20~50 cm之间的不同液位,浮子最大的抖动时间,即RB端口持续高电平的时间不超过2 s,如表1所示。

表1 不同液面高度下抖动的最大时间

Tab.1 Maximum jitter time under different depths of liquid level

液面高度/cm	50	40	30	20
最大抖动时间/s	1.52	1.56	1.57	1.73

由此可以假定,当RB端口的高电平或者低电平持续的时间小于2 s时,为干扰信号。利用这一特点,可设计一种脉宽数字滤波电路,当脉宽小于某一设定值时,将滤除干扰,从而有效抑制和消除抖动干扰。在本设计方案中,滤波脉宽的选择是影响数字滤波器滤波效果的关键,脉宽太小,部分较强干扰信号不能与数字信号分离;太大则会产生失真。智能液位开关的设计正是基于此可调脉宽的数字滤波电路,以适应不同的应用场合。

一种能有效实现滤除干扰抖动信号的电路设计原理图如图4所示。主要采用计数的方法来实现数字滤波。

工作原理分析:利用输入信号 $f_{in}$ 上升沿使能4位二进制同步计数器74LS161N开始计数,下降沿清零计数器, $f_{in}$ 与图2的RB端连接。其中,A1和A2模块以及B1和B2模块均采用同步级联,构成2个256( $2^8 = 256$ )进制计数电路。输入信号经分压、反向后分别被送到A1和B1的计数使能端和异步清零端。当输入信号为高电平时,经一级反向后B1输入为低电平,此时B1、B2不计数,A1、A2开始计数;反之,当输入为低电平时,B1、B2开始计数,而A1、A2不计数。由于4个计数器的计数脉冲(CLK)均为128 Hz,且它们的预置输入端(A、B、C、D)都为低电平,当A1输入的高电平持续2 s及以上时,A2的进位输出端 $O_c$ 输出一个脉冲周期的高电平;反之,则 $O_c$ 一直保持低电平,同理可分析B1输入端。分别将A2和B2的进位输出端接入双D触发器74LS74N的第4管脚置位引脚和第1管脚复位引脚。当A1输入的高电平持续2 s后,在A2进位输出端输出的高电平经74LS14N反向之后变为低电平,使得输出端1Q输出高电平;反之,当A1输入的低电平持续2 s后,在A2进位输出端输出的高电平经74LS14N反向之后变为高电平,使得输出端

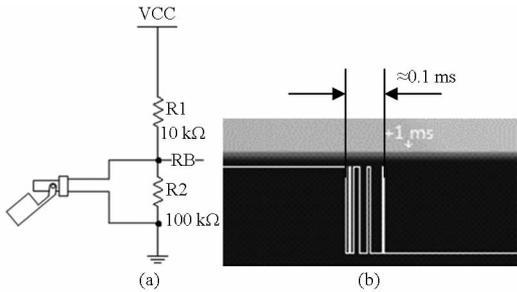


图2 不采用消抖措施的电路图与开关动作波形图

Fig.2 Circuit and switching operation waveform diagram

without jitter elimination measures

(a) 液位浮子连接图 (b) 不消抖的电平下降沿

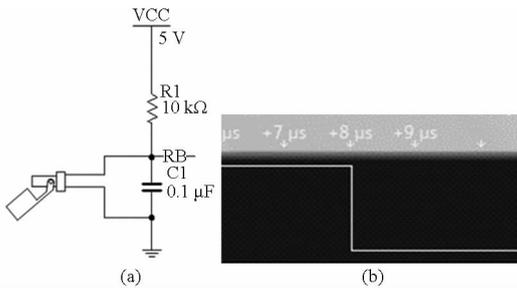


图3 采用电容消抖的电路图与开关动作波形图

Fig.3 Circuit and switching operation waveform diagram adopted measures of capacitance

(a) 浮子连接改进图 (b) 消抖后电平下降沿

端电平发生高低变化,观察发现不使用电容消抖的情况下,在每次电平变化的下降沿均会产生毛刺,即为开关由开到闭时产生的扰动,如图2b所示,毛刺为3或4次的微小抖动,持续时长约为0.1 ms。改成电容后,开关在闭合时发生抖动时,电容器将多次充电,缓慢到达高电平,再迅速放电到0 V,只要充电时间常数足够大,就能使得RB端口电压保持为低电平。使用逻辑分析仪测量时,设备的正常工作电压在5.5 V以下,最高承受电压是7.5 V。小于1.5 V则被认为是低电平,1.5 V到5.5 V之间为高电平。根据充电公式

$$V_{RB} = V_{CC}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1)$$

当RB电压充电到1.5 V,所需时间为0.3567 ms,大于毛刺存在时间,改进电路可有效消除毛刺信号的影响,开关动作波形如图3b。从图中可以看出,较不采用防抖电路的开关动作波形图,毛刺得到显著

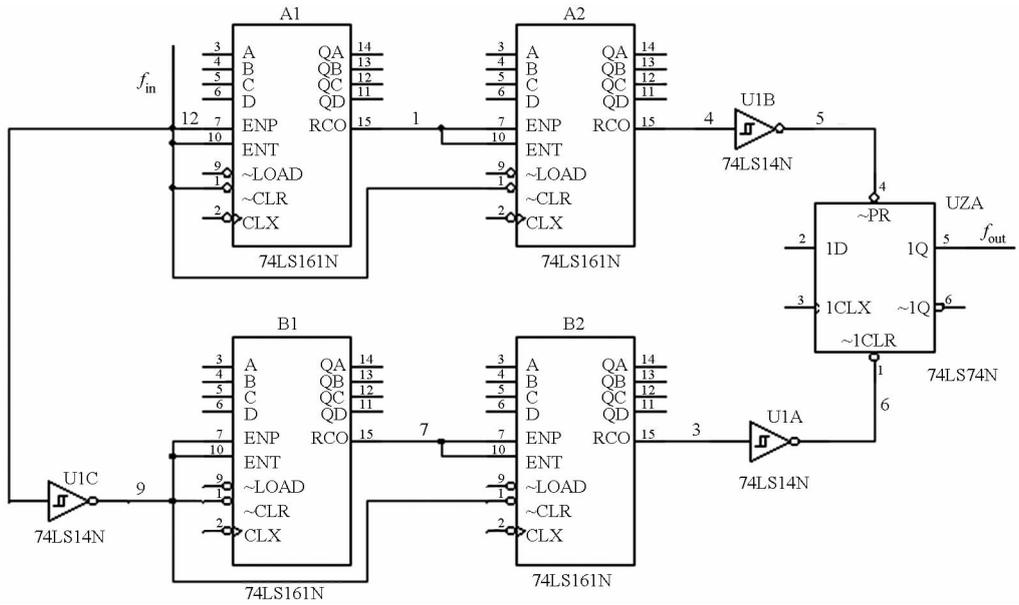


图 4 数字滤波电路

Fig. 4 Digital filter circuit

1Q 输出低电平。

电路经过 Multisim 12.0 仿真, 仿真中使用振幅为 5 V、频率为 128 Hz 的方波作为 4 个计数器的计数脉冲。振幅为 5 V、频率为 0.2 Hz ( $T/2 = 2.5\text{ s} > 2\text{ s}$ )、占空比为 50% 的方波作为模拟的信号输入。在集成电路电源输入端以及地之间分别接了电容来消除电源线上的噪声干扰。

输入信号以及输出信号的波形图如图 5 所示。波形从上到下依次为 128 Hz 计数脉冲、输入信号 (0.2 Hz)、A2 进位输出端、B2 进位输出端, 输出信号、反向后的 A2 进位输出端、反向后的 B2 进位输出端、逻辑分析仪内部频率 (1 kHz)。从仿真图中可以看出, 当输入信号的高电平或者低电平持续超过 2 s 时, 输出信号能完整地保存波形, 且输出信号相比输入信号有 2 s 的延迟。该延迟时间的长短主要取决于计数脉冲频率  $f_{CLK}$  的大小, 即以脉冲频率计数 256 进制电路的用时, 可得到延时时间  $t = 256/f_{CLK}$ 。

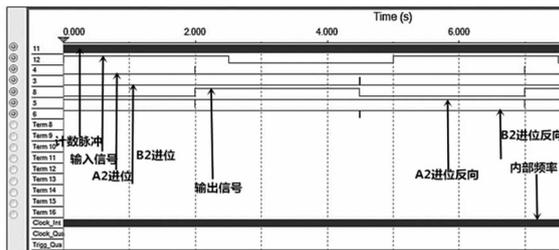


图 5 输入信号占空比为 50% 的仿真输出波形

Fig. 5 Input signal 50% duty cycle of output waveform simulation

输入信号的占空比调整为 90% 时, 此时输入信号高电平的持续时间为 4.5 s, 低电平的持续时间为 0.5 s, 此时输出波形如图 6 所示。输出信号滤除了

0.5 s 的低电平, 保持了之前的高电平状态。这是由于 74LS74N 双 D 触发器的置位和复位引脚都为高电平时可以保持之前的输出电平, 这就使得该数字滤波电路有“记忆”功能。若输入信号的低电平或者高电平持续时间低于预设值, 如本实例中为 2 s, 电路的输出电平会保持之前输入电平持续时间大于 2 s 的输出状态, 而将持续时间小于预设值的电平变化当作干扰信号滤除。这种性质对于水肥一体化系统中混肥罐和回液桶的液位控制有一定的实用性。

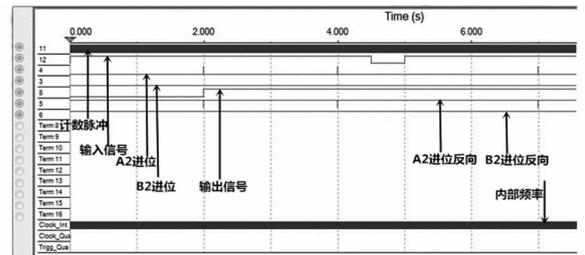


图 6 输入信号占空比为 90% 的仿真输出波形

Fig. 6 Input signal 90% duty cycle of output waveform simulation

设备开始工作时, 混肥罐和回液桶内无肥液, 浮子下垂, 输入信号为高电平, 抽肥泵不工作, 当液面慢慢达到浮子高度附近时浮子会产生抖动, 而此时输出信号保持之前浮子垂直状态时的高电平, 当液面彻底高过浮子时, 输入信号保持低电平超过 2 s 时, 输出信号变为低电平, 此时抽肥泵工作, 开始灌溉; 当灌溉即将结束时, 液面开始慢慢下降, 到浮子附近时, 产生的抖动同样被当作干扰被滤除, 输出电平保持在低电平, 当液面彻底低于浮子的高度时, 输入信号保持高电平超过 2 s, 此时输出电平变为高电平, 抽肥泵停止工作, 灌溉结束。

仿真电路图中的 128 Hz 方波产生方法很多,可以使用 32.768 kHz 石英晶振经 8 分频输出,或者采用 51 单片机定时器中断产生等。从单纯硬件方面以及低成本考虑,本系统采用 555 定时器产生,电路如图 7 所示。刚通电时,C1 上的电压不能突变,即复位 THR 和置位 TRI 端起始电平为 1,555 内部放电三极管截止,输出 OUT 为 1,C1 通过 R3 和 D1 充电;充电时间为  $t_{in} = 0.7R_3C_1$  时,THR 和 TRI 电压达到  $3V_{CC}/2$ ,555 内部三极管导通,OUT 电平变为 0,C1 通过 R4 和 D2 以及内部三极管放电;放电时间为  $t_{out} = 0.7R_4C_1$  时,THR 和 TRI 电压变为  $V_{CC}/3$ ,内部三极管截止,OUT 电平又变为 1。如此循环,产生矩形脉冲信号。

方波频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.7(R_3 + R_4)C_1} \quad (2)$$

式中  $R_3$ ——充电电阻  $R_4$ ——放电电阻

占空比为

$$D = \frac{t_{in}}{t_{out}} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (3)$$

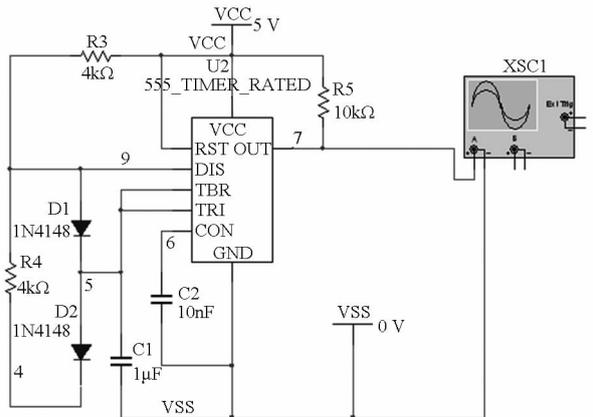


图 7 128 Hz 计数脉冲发生电路

Fig. 7 128 Hz counting pulse generating circuit

由图 6 仿真产生的方波周期  $T$  为 7.670 ms,即  $f$  约为 130.38 Hz。

### 1.2.3 软件设计

本系统采用 51 单片机定时器中断编程,单片机型号为 STC89C52。将 RB 接单电机 P2.0 端口作为输入端,P0.1 作为输出端。单片机同样以 2 s 为周期,连续读取 P2.0 端口的状态,每隔 50 ms 读一次,即一个周期内读取 40 次。只要至少一次检测到输入端电平为 0,即 2 s 内至少有一次浮子上浮,就判断液面在浮子之上,此时保持输出电平为 0,打开抽水泵。反之,如果在 2 s 内检测 40 次都发现输入端电平为 1,即浮子垂直,判断液面彻底在浮子之下,输出电平为 1,抽肥泵不工作,程序流程如图 8 所示。

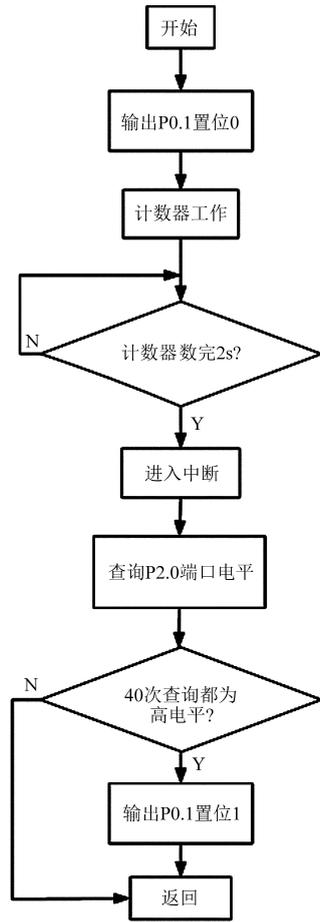


图 8 程序流程图

Fig. 8 Program flow chart

## 2 试验与结果分析

### 2.1 不同液位的浮子抖动

实际灌溉时,设备液面的高度应保持在下端浮子和连接隔膜阀的浮球之间。测试液位高度分别取 50、40、30、20 cm,测量浮子抖动的次数以及最大抖动持续时间。由图 9 可知,随着进水压的下降,浮子抖动的次数逐渐减少,混肥桶内水翻滚的剧烈程度也逐渐减轻,浮子抖动的最大时间有比较大的随机性。然而,在不同液位高度下浮子的最大抖动时间为 1.73 s,均未超过 2 s,所以在数字滤波设计时脉宽选择为 2 s。由图 10 可知,在不同的进水压下内循环 50 s,进水管的水量(单位 L)与进水压成正比,决定系数  $R^2$  达到 0.9637,因此,试验过程中可以通过调节水压来控制进水量。

### 2.2 抗干扰硬件性能测试

在本试验条件下的施肥灌溉中,由于混肥罐液面保持在浮子之上,抖动的最大时间小于 2 s,经滤波后输出电平一直为高,无法触发逻辑分析仪采集数据,导致无法观察输出波形。因此,采用手动方式保持 RB 端高电平或低电平持续 2 s 以上,以便观察滤波后的状态以及测试电路的性能。实际测试中,

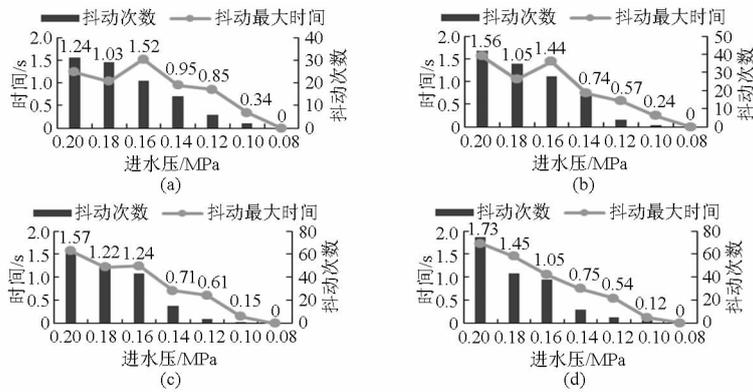


图9 不同液位高度下浮子的抖动情况

Fig. 9 Floater jitter at different depths

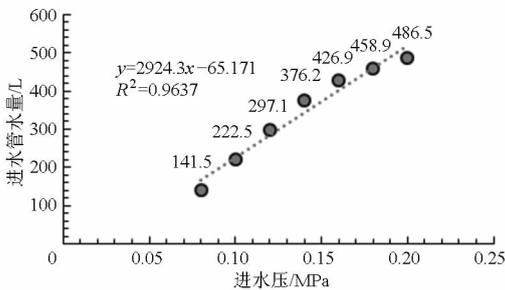


图10 不同进水压下的流量变化曲线

Fig. 10 Flow curves under different inlet pressures

浮子固定在长、宽、高分别为 40、37.5、33 cm 的 PP 环保树脂桶,高度为 10 cm,浮子的导线接入电路。电容消抖电路和数字滤波电路的电源均为 5 V, Saleae 八通道逻辑分析仪接入计算机。

首先测试计数脉冲发生器,经过实际测量,此处 R3 和 R4 均选择 4.7 k $\Omega$ ,理论占空比为 50%。产生的方波如图 11 所示,以箭头标注的一个周期的方波为例,方波的占空比为 49.96%,频率为 123.18 Hz。那么理论上的延迟时间为 2.098 s。

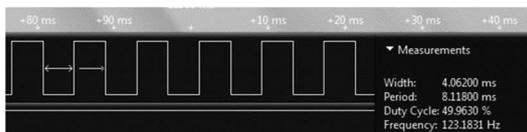


图11 555 实际产生的脉冲方波

Fig. 11 Actual square wave pulse generated by 555

用手拨动浮子,使浮子上浮和落下的时间都大于 2 s,得到的对比波形如图 12a 所示,从上到下的波形依次为:输入信号、A2 进位输出端、B2 进位输出端、输出信号。可以看到,当浮子上浮或落下的时间大于 2 s 时,输出的波形不变,但滤波后的方波信号比现场手动信号时间上延迟大约 2.11 s (图中  $|T_1 - T_2|$ ),在计数器数完 256 时,进位输出端输出一个计数脉冲宽度的高电平,试验结果与仿真情况一致,延迟误差为 0.5%。

同样拨动浮子,使浮子在保持高电平或者低电平大于 2 s 后再快速抖动浮子,观察输出信号的波

形,如图 12b 所示。可以观察到,当浮子产生抖动时(输入信号的电平持续时间小于 2 s),输出信号会保持之前的状态,同样相比输入信号延迟大约 2.11 s,与仿真的结果相吻合。

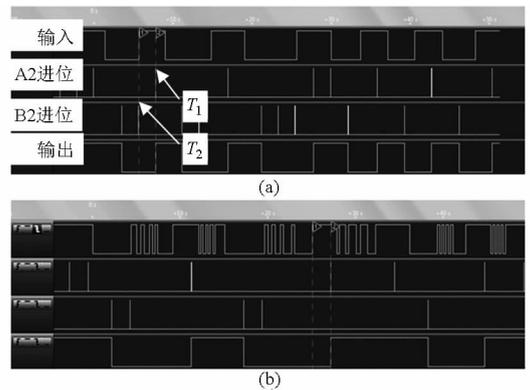


图12 实际输出波形

Fig. 12 Real output waveform

### 2.3 可调智能开关分析

本试验使用的水肥一体化设备中液位浮子的抖动时间不超过 2 s。在其他应用场合,应根据实际现场情况,选择适当的滤波脉宽。软件方面,可以修改程序中中断产生的周期来滤除相应的抖动信号;在硬件方面,使用 555 定时器实际产生的脉冲频率与理论值比较会有误差,可以根据改变 R3 和 R4 的阻值来调整频率以及占空比,或者级联不同数量的计数器来调整滤波脉宽。本文通过试验测得了几组不同阻值产生的脉冲占空比、频率以及脉宽,如表 2 所示。当阻值为 10 k $\Omega$  时,可消除最大抖动时间为

表2 不同电阻下产生的脉冲

Tab. 2 Pulse generated under different resistances

阻值/k $\Omega$	占空比/%	频率/Hz	可滤除的最大抖动时间/s
1.0	49.04	534.19	0.48
2.2	48.81	252.14	1.02
3.3	48.12	167.90	1.52
5.0	49.83	114.29	2.24
10.0	50.01	59.82	4.28

4.28 s,说明可以用在较大规模灌溉,进入压和流量较大的场合。

### 3 结束语

在实际灌溉施肥的水位监测系统中经常应用液位开关来获取水位信号,但由于开关与水流本身特性导致开关容易产生扰动,因此必须对开关扰动进行防护,提高系统的可靠性。

本文从软件和硬件两方面,分别利用计数器设

计数字滤波电路以及单片机计数器中断的方式来消除浮子抖动,试验取得了良好的效果,消除了毛刺信号和浪涌波动等干扰。实际滤波中,必须根据现场情况选择合适的脉宽,过大或过小的脉宽都可能导致输出波形的失真。智能液位开关可以从硬件上改变电路中的阻值或者计数器的数量,亦可以从软件上修改单片机产生中断周期的选项来达到适应不同工作场合的需求,实现智能化的设计和应用,提高稳定性和实用性。

### 参 考 文 献

- 袁洪波,程曼,庞树杰,等. 日光温室水肥一体灌溉循环系统构建及性能试验[J]. 农业工程学报,2014,30(12):72-78.  
Yuan Hongbo, Cheng Man, Pang Shujie, et al. Construction and performance experiment of integrated water and fertilization irrigation recycling system[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(12):72-78. (in Chinese)
- 李晓欣,胡春胜,陈素英. 控制灌水对华北高产区土壤硝态氮累积的影响[J]. 河北农业科学,2005,9(3):6-10.  
Li Xiaoxin, Hu Chunsheng, Chen Suying. Effects of controlled irrigation on nitrate accumulation in North China[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2005,9(3):6-10. (in Chinese)
- 袁洪波. 日光温室封闭式栽培系统关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.  
Yuan Hongbo. Study on key technologies for closed cultivation systems in solar greenhouses [D]. Beijing: China Agricultural University,2015. (in Chinese)
- 周博,周建斌. 不同水肥调控措施对日光温室土壤水分和番茄水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(1):211-216.  
Zhou Bo, Zhou Jianbin. Effects of different fertilizers and water managements on water distribution in soil and water use efficiency of tomato[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed.,2009,37(1):211-216. (in Chinese)
- 袁洪波,王海华,庞树杰,等. 日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(21):159-165.  
Yuan Hongbo, Wang Haihua, Pang Shujie, et al. Design and experiment of closed culture system for solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE,2013,29(21):159-165. (in Chinese)
- 刘建英,赵宏儒,张丽清,等. 保护地黄瓜水、肥一体化高效栽培技术[J]. 华北农学报,2005,20(增刊1):206-208.  
Liu Jianying, Zhao Hongru, Zhang Liqing, et al. High-effective culture technique of unopen cucumber with trickle irrigation of moisture and fertilizer integrated[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica,2005,20(Supp. 1):206-208. (in Chinese)
- 李迎霞,杜尚丰. 中国温室环境智能控制算法研究进展[J]. 农业工程学报,2004,20(2):267-272.  
Li Yingxia, Du Shangfeng. Advances of intelligent control algorithm of greenhouse environment in China[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(2):267-272. (in Chinese)
- Usavadee Tuntiwaranuruk, Sirichai Thepa, Suvit Tia, et al. Modeling of soil temperature and moisture with and without rice husks in an agriculture greenhouse[J]. Renewable Energy,2006,31(12):1934-1949.
- 吴涛铄. FPGA设计中抗干扰问题及毛刺信号的消除[J]. 呼伦贝尔学院学报,2009,17(6):59-62.  
Wu Taosuo. Anti-interference problem and burr elimination of signals in the design of FPGA [J]. Journal of Hulunbuir College,2009,17(6):59-62. (in Chinese)
- 盛开义.  $\Sigma\Delta$ ADC的数字滤波电路及抖动电路的设计[D]. 上海:复旦大学,2010.  
Sheng Kaiyi. The design of the digital filter circuit and the dither circuit of  $\Sigma\Delta$ ADC [D]. Shanghai: Fudan University,2010. (in Chinese)
- 向红军,雷彬. 基于单片机系统的数字滤波方法的研究[J]. 电测与仪表,2005,42(9):53-55.  
Xiang Hongjun, Lei Bin. The selection for digital filtering method based on SCM system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2005,42(9):53-55. (in Chinese)
- 郑屹,张志文. 惯导组件多路脉冲计数系统设计[J]. 西安工业大学学报,2011,31(3):290-293,302.  
Zheng Yi, Zhang Zhiwen. Pulse digital filtering and seamless counting circuit design [J]. Journal of Xi'an Technological University,2011,31(3):290-293,302. (in Chinese)
- Gieling Th H, Janssen H J J, van Straten G, et al. Identification and simulated control of greenhouse closed water supply systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2000,26(3):361-374.
- Lv Chengang, Hu Zhixiong, Zu Peng, et al. Demodulation system for fiber bragg grating sensors using digital filtering technique[J]. Transactions of Tianjin University,2008,14(1):27-30.
- Wang Shuchang, Huang Sixun, Zhang Weimin, et al. Numerical experiments and analysis of digital filter initialization for WRF Model[J]. Journal of Tropical Meteorology,2008,14(1):1-10.

- 16 田黎育,袁一丹,李晓阳,等. 基于 FPGA 的在线可重配置数字下变频器的设计与实现[J]. 北京理工大学学报,2013,33(3):311-317.  
Tian Liyu, Yuan Yidan, Li Xiaoyang, et al. Design and implementation of the on-line configurable digital down converter(DDC) based on FPGA[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2013,33(3):311-317. (in Chinese)
- 17 Wang Xiaohua, He Yigang. Optimal design study of high order FIR digital filters based on neural network algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2004,15(2):115-119,130.
- 18 Bai Xueling, Zhang Hongmei. Design of digital filter based on VB and Matlab[C] // Proceedings of 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments(ICEMI'2009),2009:4-85-4-88.
- 19 Hu Wenjing, Qiu Runhe, Li Waiyun. A new design method for variable digital filter based on field programmable gate array (FPGA)[J]. Journal of Donghua University:English Edition,2012,29(2):193-196.
- 20 骆毅,张志文. 脉冲信号数字滤波以及无缝计数电路设计[J]. 西安工业大学学报,2012,32(2):157-161.  
Luo Yi, Zhang Zhiwen. Pulse digital filtering and seamless counting circuit design[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2012,32(2):157-161. (in Chinese)
- 21 郑涛,石秀华,许晖. 数字滤波新方法尝试与验证[J]. 测控技术,2004,23(4):19-20.  
Zheng Tao, Shi Xiuhua, Xu Hui. New method and its feasibility analysis to digital filtering[J]. Technology of Measure and Control, 2004,23(4):19-20. (in Chinese)