

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.05.018

## 单节干电池供电的滴灌控制器的设计与试验

洪添胜, 冯瑞珏, 李加念, 叶智杰, 卢加纳

(华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 为提高无电力设施果园的滴灌管理效率, 设计了一款可用单节干电池供电的滴灌定时自动控制器。控制器主要由 MSP430F2132 单片机、电源升压电路、人机交互单元、双稳态脉冲电磁阀及其驱动电路组成。在 0.9 ~ 1.8 V 输入电压范围内测试了控制器的静态电流和电磁阀动作时的工作电流。结果表明: 静态电流随着输入电压的减小而增大, 其范围为 20.0 ~ 46.6  $\mu\text{A}$ ; 控制器驱动电磁阀开关动作时所消耗的电流随电压的升高而升高, 其范围为 200 ~ 413 mA, 而且电磁阀在开启时所消耗的电流略大于关闭时。分别以单节型号为劲量 L91 的 1.5 V AA 电池、2 节同型号的电池并联作为电源供电, 使控制器每休眠 5 s 驱动电磁阀开关动作一次, 测试了电池的使用寿命。结果表明: 能驱动电磁阀的最低电压为 0.9 V; 单节电池持续供电 30 h, 共驱动电磁阀开关动作 11 160 次; 两节电池并联可用 46 h, 共动作 16 740 次。根据试验结果估算出, 一节额定容量为 3 000 mA · h 的 1.5 V 电池可使滴灌控制器工作 3 a 以上。

**关键词:** 滴灌控制器; 低功耗; 电池; 电磁阀; 自动控制

**中图分类号:** S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)05-0455-06

Design and experiment for drip irrigation  
controller powered by single battery

Hong Tiansheng, Feng Ruijue, Li Jianian, Ye Zhijie, Lu Jiana

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract:** In order to improve the drip-irrigating management efficiency in orchard without access to electric power, a low-cost auto-timer drip irrigation controller powered by a single battery has been developed. The controller is composed of a MSP430F2132 microcontroller, a power boost circuit, a human-computer interaction unit, a bi-stable pulse solenoid valve and a driving circuit. The quiescent current of the controller was measured with the input voltage between 0.9 V and 1.8 V and the result showed that the quiescent current increased as the input voltage decreased, increasing from 20  $\mu\text{A}$  to 46.6  $\mu\text{A}$ . When the controller switched the valve on and off the consumption of current increased as the voltage increased, ranging from 200 mA to 413 mA. At the same time the current of the on-valve state was slightly larger than the off-valve state. The testing was done in two phases with the controller programmed to drive the valve on and off alternately at each 5-second standby time in both phases. In the first phase it was powered by a L91 1.5 V lithium battery and the result showed that the minimum battery voltage driving the valve was 0.9 V and a single battery could last for 30 h and drive the valve 11 160 times during the period. In the second phase it was powered by two parallel connected L91 batteries and the tests showed that the controller could drive the valve 16 740 times that is a longer time

收稿日期: 2011-01-25

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903023); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(农科教发[2011]3号)

作者简介: 洪添胜(1955—), 男, 广东梅县人, 教授, 博士生导师(tshong@scau.edu.cn), 主要从事机电一体化技术和信息技术应用研究。  
冯瑞珏(1985—), 女, 广东罗定人, 硕士研究生(342559161@qq.com), 主要从事农业工程与自动化研究。

of 46 hours consecutive hours. Accordingly it was estimated that a 1.5 V 3 000 mA · h on battery can adequately power the controller for at least 3 years.

**Key words:** drip irrigation controller; low power; battery; solenoid valve; automatic control

滴灌具有节水、增产和改善作物品质等诸多优势,是解决灌溉用水短缺的有效方法之一<sup>[1]</sup>。在国外,节水灌溉控制系统的发展起步早,自动化程度高,已经形成了比较完善的滴灌控制体系。滴灌方式普遍采用计算机控制,特别适用于大规模滴灌<sup>[2-3]</sup>。我国自引入滴灌设备至今,滴灌技术应用和设备开发已取得一定的进展。一些研究单位开始尝试适合我国国情的滴灌控制器的自主设计与开发,研制了如滴灌带、调压器和施肥器等<sup>[4-8]</sup>。但目前我国温室或大田采用的滴灌产品具有投入成本较高、使用寿命有限和不易操作等特点<sup>[9]</sup>。在经济较落后的地区中得不到农民的自发性使用,滴灌技术得不到推广。要在小规模种植的农户中推广滴灌技术,研发操作简单和可以长效使用的小型滴灌设备是滴灌发展的一个重要方向<sup>[10-11]</sup>。为此,文中设计了一个可用单节电池供电、控制灵活和人机交互良好的低功耗滴灌控制器。

## 1 总体设计方案

控制器的总体设计方案如图 1 所示,它主要由单片机、2 个升压电路、人机交互单元、电磁阀及其驱动电路组成。其中 2.0 V 升压电路用于将电池电压升至 2.0 V,为单片机主控电路及人机交互单元供电。5.5 V 升压电路用于将电池电压升至 5.5 V,为电磁阀的驱动电路供电。人机交互单元用于设置滴灌的周期、持续时间和系统的初始时钟等。单片机以其内部定时器来产生实时时钟,并根据人机交互单元设定的时间参数进行定时滴灌的自动控制。

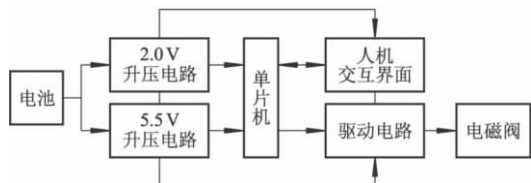


图 1 控制器总体设计框图

Fig. 1 Overall design diagram of controller

## 2 硬件电路设计

### 2.1 核心微处理器

核心微处理器选用 TI 公司的 MSP430F2132 单

片机,它是一款低功耗高性能的 16 位单片机,其工作电压为 1.8 ~ 3.6 V,在休眠状态下电流仅 0.7  $\mu\text{A}$ ,在 1 MHz 下全速运行的电流约为 250  $\mu\text{A}$ 。芯片内部的各个模块相互独立,如 A/D 转换、定时器等都可以在 CPU 休眠的状态下独立运行。若需要主 CPU 运行,任何一个模块都可以通过中断唤醒 CPU,从而使系统以最低功耗工作。由于单片机工作电流随电压的降低而减小,综合考虑功耗及其可靠运行等因素,选用 2.0 V 作为单片机的供电电压。

### 2.2 核心微处理器电源电路

选用 1.5 V 的 AA 电池(型号为劲量 L91,一次性锂电池)作为控制器的供电电源,通过如图 2 所示的电源升压电路将电池电压调节至 2.0 V 给单片机主控电路供电。该升压电路结构简单,主要由升压芯片 TPS61220 与少量的电阻、电容及电感组成。其中,TPS61220 是 TI 公司推出的一款 2 MHz DC/DC 升压转换器,其输入电压为 0.7 ~ 5.5 V,输出电压为 1.8 ~ 5.5 V,静态电流为 5  $\mu\text{A}$ ,可以在轻负载的条件下维持极高的转换效率。

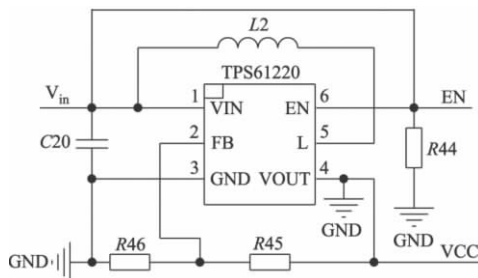


图 2 2.0 V 升压电路

Fig. 2 2.0 V step-up circuit

### 2.3 电磁阀驱动电路

电磁阀是滴灌最直接的执行器件,是整个滴灌控制器中耗电量最大的部件。选用接口为 32 mm 的双稳态脉冲电磁阀<sup>[12]</sup>,适合应用于低功耗产品的设计。电磁阀的驱动电路如图 3 所示,由 5.5 V 升压电路和 H 桥电路两部分组成。

5.5 V 升压电路如图 3a 所示。其中,TPS61200 是 TI 公司推出的一款高转换效率的 DC/DC 升压转换器,且设置有高电平有效的使能端 EN(第 6 脚),由单片机与该使能端连接,控制其是否使能工作,当禁止使能时 TPS61200 处于掉电状态,其消耗电流最

大为 2  $\mu\text{A}$ 。在升压电路的输出端设置一只 3 300  $\mu\text{F}$  的电解电容,利用其储电特性,为驱动电磁阀提供足够的电流,避免电磁阀开关动作时的瞬间大电流引起电池电压的大幅跌落,从而导致电路不稳定。

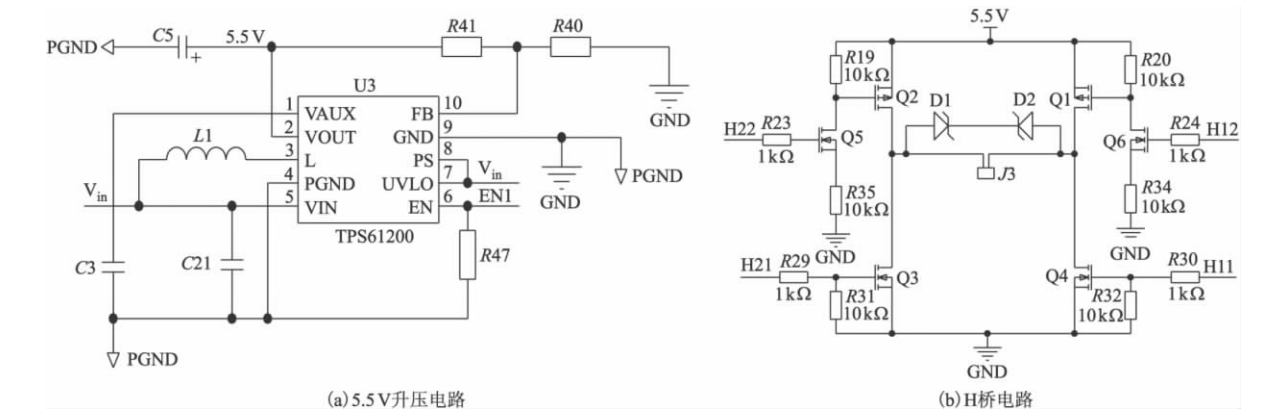


图 3 电磁阀驱动电路  
Fig. 3 Schematic of solenoid valve driving circuit

H 桥电路如图 3b 所示,它主要由 6 只 MOS 管组成。其中 Q1、Q2 是 P 沟道 MOS 管,Q3、Q4、Q5、Q6 是 N 沟道 MOS 管;D1、D2 是两个 5.1 V 稳压管,它们阴极对阴极连接,主要是用来在电磁阀动作结束瞬间时形成一条泄流回路,以保护 MOS 管不被电磁阀动作结束瞬间所产生的高压反向电动势击穿。H 桥的 4 个桥臂 H22、H21、H12 和 H11 分别与单片机 I/O 口相连,通过 I/O 口产生高低电平控制 MOS 管的通断,从而产生正向或反向的脉冲电压来驱动电磁阀的开启与关闭。

当要驱动电磁阀进行开关动作时,先使 5.5 V 升压电路工作 100 ms 以使其输出端的大电容储存了足够的电能,然后再通过单片机的 I/O 口控制 H 桥电路驱动电磁阀的开关。

2.4 人机交互单元

控制器的人机交互由一个 12 档位的波段开关和刻度面板相配合来实现,通过人机交互单元可实现滴灌周期、滴灌持续时间和系统时钟的设定,以及

可实现滴灌的手动开关操作。波段开关的每一个档位分别对应于一个数值或功能,其具体的对应关系如图 4a 所示,面板的外圈刻度用于设置滴灌持续时间和滴灌周期,内圈刻度用于设定系统时钟。波段开关的各个档位的区分是通过电阻分压来实现的,通过对各个档位对应的电压进行检测就可判断波段开关转到哪一个档位,其检测电路如图 4b 所示,13 只 1 000  $\Omega$  的电阻串联对 2 V 电压进行分压,波段开关的各个档位分别与 1 只电阻相连,以使波段开关的每个档位对应于 1 个电压值,波段开关的公共端与单片机的 A/D 转换引脚连接。

在电阻串联支路中串联了 1 只 N 沟道的 MOS 管,用于控制该支路的通断。当单片机需要检测波段开关的档位时,与 MOS 管相连的 I/O 口输出高电平,将 MOS 管导通,单片机进行 A/D 转换,根据检测的电压值就可判别波段开关转到哪个档位。而在其余时间,使 MOS 管截止,以切断电阻网络,从而使该支路不消耗电能。

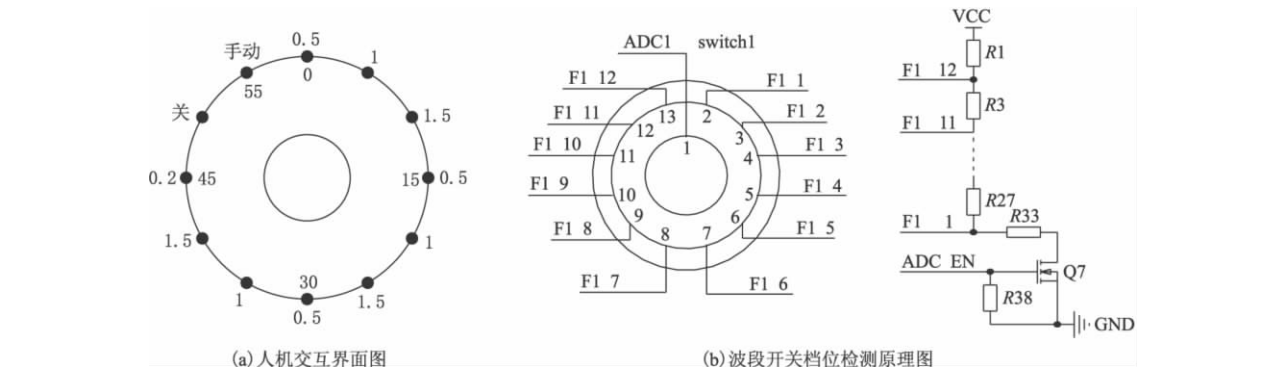


图 4 人机交互单元  
Fig. 4 Human-computer interaction unit

## 2.5 低功耗设计

为降低控制器的功耗,延长电池的使用寿命,应尽量使控制器处于休眠状态,而且在控制器唤醒工作时采用分时分区供电的电源管理策略,即某一时刻只使相应的电路单元工作。

由于实际应用中,滴灌执行的次数不多,一般是每天上午和下午各进行一次,而且操作的实时性要求不高,因此可使控制器每休眠 15 s 唤醒一次进行工作。控制器唤醒后,先使 A/D 转换以检测波段开关的档位(当 A/D 转换完成后立即禁止其使能),并进行相应的运算处理,然后判断是否需要执行滴灌的启停动作,即电磁阀的开关动作。若不需要执行则立即进入 LPM3 休眠模式(此模式下单片机消耗的电流约为  $0.7 \mu\text{A}$ ),若需要执行滴灌操作时,则先使 5.5 V 升压电路工作 100 ms 以使大电容储存足够的电能,然后再打开 H 桥电路的正向或反向通路 30 ms 以驱动电磁阀开关动作,动作结束时立即禁止 5.5 V 升压电路工作并使控制器进入 LPM3 休眠模式。由于控制器唤醒后工作时间不大于 130 ms,因此可使控制器 99% 以上的时间处于休眠状态。

## 3 功耗测试试验

### 3.1 控制器静态电流

静态电流  $I_0$  是指控制器处于休眠模式时所消耗的电流,它主要由升压芯片 TPS1220 消耗的电流和单片机处于 LPM3 休眠状态时所消耗的电流组成。为了延长电池的使用寿命, $I_0$  值应该越小越好,而且控制器处于休眠模式的时间应尽可能的长,但考虑控制器执行滴灌时的响应速率,选择每休眠 15 s 退出 LPM3 模式。本试验采用可调数字电源(型号为 MATRIX MPS-3003D)模拟单节电池电压  $U_{in}$ ,在 0.9 ~ 1.8 V 范围内,用数字万用表(型号为 FLUKE 18B)串联在电源输入端,编程使控制器一直处于休眠模式,测试静态电流。每组数据测量 2 次,取其平均值作为结果,试验结果如图 5 所示。

由图 5 可得,静态电流随电压的减小而增大,当电压为 1.8 ~ 1.5 V 时静态电流约为  $20 \mu\text{A}$ ,当电压为 1.5 ~ 1.2 V 时静态电流约为  $25 \mu\text{A}$ ,当电压下降到 0.9 V 时静态电流最大,为  $46.6 \mu\text{A}$ 。这主要是电源的升压芯片 TPS61220 的转换效率引起的。根据升压芯片的转换公式可知,随着电压的下降,TPS61220 的转换效率下降,控制器的静态电流不断增大,转换

公式为

$$I_{\text{Batt}} = \frac{1}{\eta} \times \frac{U_{\text{CC}} I_{\text{CC}}}{U_{\text{Batt}}}$$

式中:  $\eta$  为 TPS61220 的转换效率;  $I_{\text{Batt}}$  为控制器电流;  $U_{\text{Batt}}$  为电池电压;  $U_{\text{CC}}$  为 MSP430F2132 的工作电压,大小为 2.0 V;  $I_{\text{CC}}$  为 MSP430F2132 的工作电流,约  $10 \mu\text{A}$ 。

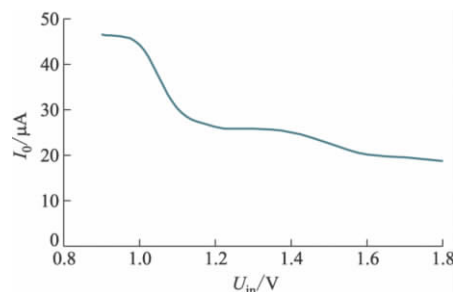


图 5 不同工作电压下控制器的静态电流

Fig. 5 Quiescent current of controller under different supply voltages

### 3.2 控制器工作电流

控制器的工作电流  $I_1$  是指控制器唤醒后全速运行时所消耗的电流。由控制器的运行机制可知,此电流主要分为两大部分:单片机进行 A/D 转换及运算处理时控制器消耗的电流  $I_{11}$  和控制器驱动电磁阀开关动作时所消耗的电流  $I_{12}$ 。

由于控制器处于进行 A/D 转换及运算处理的时间约为几十  $\mu\text{s}$ ,为便于测试此时的电流  $I_{11}$ ,编写程序使控制器一直处于此状态,并用数字万用表在 0.9 ~ 1.8 V 的输入电压(由可调数字电源提供)范围内测量控制器消耗的电流,试验数据如图 6 所示。由图可知,输入电压越低,控制器的电流越大,在输入电压为 0.8 V 时,工作电流达  $1400 \mu\text{A}$ 。

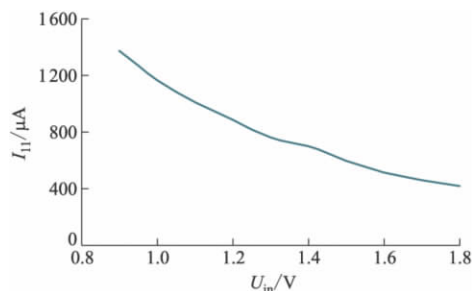


图 6 不同电压下控制器全速运行时的电流

Fig. 6 Controller working current under different supply voltages

管道中水压的大小对电磁阀开关动作时的能耗需求影响不显著,在相同电压下,由水压不同造成的电磁阀开关动作的电流差异最大仅为 28 mA,因此



可在空载条件下进行电磁阀开关动作功耗的测试。由于电磁阀的开关动作只需 30 ms 即可完成,为了测定驱动电磁阀开关动作时所消耗的电流,在控制器电源输入端串联一个  $0.1\ \Omega\ 5\ \text{W}$  的功率电阻,并利用 LabVIEW 8.6 平台进行编程,控制北京阿尔泰科技的 USB5935 数据采集卡每 1 ms 采集 1 次电阻两端的电压,最后换算为电流,即可得出电磁阀动作时控制器所消耗的电流  $I_{12}$ 。试验结果如图 7 所示,试验装置如图 8 所示。

由图 8 可得,控制器驱动电磁开关动作时所消耗的电流随电压的升高而升高,当输入电压为 0.9 V 时电流约为 200  $\mu\text{A}$ ,当输入电压为 1.7 V 时电流约为 413  $\mu\text{A}$ 。而且电磁阀在开启时所消耗的电流略大于关闭时。

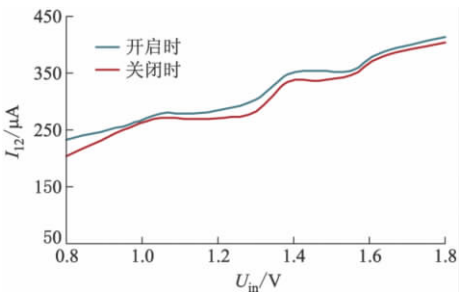


图 7 不同电压下控制器驱动电磁阀开关时消耗的电流  
Fig. 7 Current consumption of controller when driving solenoid valve open and close under different supply voltages



图 8 电磁阀开关动作的功耗测试装置  
Fig. 8 Current consumption testing setup for solenoid valve's switching

3.3 电池使用寿命的估算与测试

由前文知,控制器在整个运行过程中,其消耗的电流主要由休眠时的静态电流  $I_0$ 、唤醒后全速运行进行 A/D 转换及进行运算处理时所消耗的电流  $I_{11}$  以及驱动电磁阀开关动作时所消耗的电流  $I_{12}$  组成。表 1 给出了在各个模式下控制器电流的消耗情况,并计算出假设每天电磁阀开启和停止的次数共为 10 次时(在实际应用中,开启与停止的次数共为 4 次),平均每秒消耗的电流  $I_{av}$ 。

表 1 控制器电流消耗  
Tab. 1 Current consumption of controller

$I_{\text{Batt}}/\mu\text{A}$	典型值	最大值
$I_0$	28.23	44.30
$I_{11}$	2.40	3.50
$I_{12}$	25.20	47.80
$I_{av}$	55.83	95.60

电池的使用寿命估算结果如表 2 所示,其中  $C$  表示电池容量  $L$  表示电池使用寿命。

表 2 电池的典型使用寿命和最短使用寿命  
Tab. 2 Typical and minimum expected battery life

$C/(\text{mA} \cdot \text{h})$	$L/\text{a}$	
	典型值	最小值
3 000	6.13	3.58
1 000	2.00	1.19

为了更准确地估计电池的使用寿命和测试电池驱动电磁阀开关动作的最低电压,分别以单节型号为劲量 L91 的 1.5 V AA 干电池、2 节同型号电池并联作为电源,编程使电磁阀每 5 s 开或关动作一次进行试验,直到电磁阀不能动作为止。同时利用 LabVIEW 8.6 平台编写程序,控制数据采集卡 USB5935 每 10 min 采集一次电池电压,试验结果如图 9 所示。

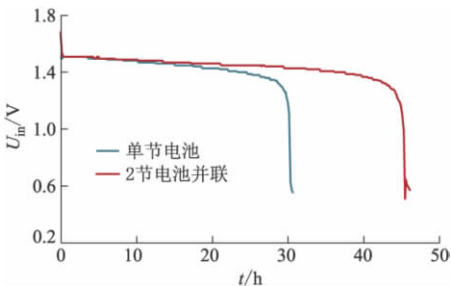


图 9 电磁阀每 5 s 连续开关动作时电池的放电情况  
Fig. 9 Battery discharging characteristics for solenoid valve's switch at every 5 s

由图 9 可知,控制器连续工作在大负载的情况下,单节电池可用 30 h,共动作 11 160 次,2 节电池并联可用 46 h,共动作 16 740 次。当电池电压降为 1 V 时,电磁阀再动作数次,电池电压迅速下降到 0.53 V,不能再驱动电磁阀动作。由试验所测试的次数可知,容量为 3 000  $\text{mA} \cdot \text{h}$  的单节电池可使用 2.92 a。如果考虑电池的自放电和其他情况,电池的实际使用寿命可能低些。

4 结 论

1) 选用双稳态脉冲电磁阀,并利用休眠机制和

电源管理技术等低功耗设计手段,设计了一款可用单节 AA 干电池供电的定时滴灌自动控制器,能根据设定的滴灌周期和滴灌时长进行自动滴灌控制,并具备手动控制的功能。

2) 控制器的静态电流约为 25  $\mu\text{A}$ ,驱动电磁阀执行滴灌启停动作时的电流最大为 413 mA。经测试,单节劲量 L91 的 1.5 V AA 电池可使控制器驱动电磁阀开关动作 11 160 次,能使控制器正常工作的电池的最低电压为 0.9 V,并根据控制器运行过程中各阶段的电流消耗情况估算出,单节 1.5 V、容量 1 000 mA $\cdot$ h 的电池可使控制器工作 1.19 a 以上。

3) 控制器成本低于 100 元,操作简单,适用于小面积果园和温室的定时滴灌自动控制,现已在华南农业大学工程学院的柑橘试验场稳定运行 5 个月。

#### 参考文献 (References)

- [1] 黄兴法,李光久.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].农业工程学报,2002,18(2):176-181.  
Huang Xingfa, Li Guangjiu. Present situation and development of subsurface drip-irrigation [J]. *Transaction of the CSAE* 2002, 18(2): 176-181. (in Chinese)
- [2] Eric Simonne, Robert Hochmuth, Jacques Breman, et al. Drip-irrigation systems for small conventionnal vegetable farms and organic vegetable farms [J/OL]. <http://edis.ifas.ufl.edu/hs388>.
- [3] Han Young J, Khalilian Ahmad, Owino Tom O, et al. Development of Clemson variable rate lateral irrigation system [J]. *Computers and Electronics in Agriculture* 2009, 68: 108-113.
- [4] 岳学军,李加念,洪添胜,等.脉冲式低功耗滴灌自动控制装置及其控制方法:中国,CN101855980A [P]. 2010-10-13.
- [5] 董加强,宋敦波,施智雄.自动滴灌系统的设计与实现[J].安徽农业科学,2009,37(20):9649-9650.  
Dong Jiaqiang, Song Dunbo, Shi Zhixiong. Design and implementation of automatic drip-irrigation system [J]. *Journal of Anhui Agricultural*, 2009, 37(20): 9649-9650. (in Chinese)
- [6] 匡秋明,赵燕东,白陈祥.节水灌溉自动控制系统的研究[J].农业工程学报,2007,23(6):136-139.
- [7] 朱志坚,早热木,尼加提·依.自控变频调速灌溉水注肥装置的研究[J].农业工程学报,2005,21(9):94-97.  
Zhu Zhijian, Zao Remu, Ni Jiaoti · Y. Autocontrol variable voltage variable frequency type of irrigation fertigation device [J]. *Transaction of the CSAE* 2005, 21(9): 94-97. (in Chinese)
- [8] Huang Xingfa, Li Guangyong, Zeng Dechao, et al. Real time determination of irrigation scheduling for micro-irrigated orchards [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(5): 79-84.
- [9] 马学良,吴晓光,苏音,等.我国滴灌技术应用发展若干问题分析[J].节水灌溉,2004(5):21-24.  
Ma Xueliang, Wu Xiaoguang, Su Yin, et al. Analysis on several problems of drip-irrigation development in China [J]. *Water Saving Irrigation*, 2004(5): 21-24. (in Chinese)
- [10] Kuniyoshi Morinaga, Osamu Sumikawa, Osamu Kawamoto, et al. New technologies and systems for high quality citrus fruit production, labor-saving and orchard construction in mountain areas of Japan [J]. *Journal of Mountain Science* 2005, 2(1): 59-67.
- [11] 朱德兰,吴普特,李岚斌,等.自压滴灌支管灌水单元设计方法[J].排灌机械工程学报,2010,28(1):59-62.  
Zhu Delan, Wu Pute, Li Lanbin, et al. Gravit-fed manifold subunit hydraulic design [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2010, 28(1): 59-62. (in Chinese)
- [12] 郭宏,朱昊,毛献辉.脉冲式电磁阀在使用中故障与排除[J].实验室研究与探索,2004,23(8):54-55.  
Guo Hong, Zhu Hao, Mao Xianhui. Pulse electromagnetic valve and its fault diagnosis [J]. *Research and Exploration in Laboratory* 2004, 23(8): 54-55. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)