

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.022

# 基于干扰观测算法的太阳能路灯控制器

袁科杰<sup>1</sup>, 王 文<sup>1\*</sup>, 叶瑞芳<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**为解决太阳能路灯系统能源利用效率低的问题,将最大功率点跟踪(MPPT)方式应用到太阳能路灯控制器中。对最大功率点跟踪原理分析后,提出了MPPT具体控制方法和Buck电路的自举,并以电路仿真软件Multisim和单片机仿真软件Proteus为平台,运用AVR Studio编程,建立了基于ATmega16为核心的控制器。在仿真达到预期控制效果的基础上,进行了实际试验。实验结果显示,用于改变Buck电路开关的PWM占空比与经验值基本符合,该结果表明太阳能电池板能以最大功率方式对蓄电池充电,并且达到了由控制器对蓄电池科学充、放电的目的。

**关键词:**路灯控制器;太阳能;最大功率点跟踪;扰动观测法;Buck电路自举

中图分类号:TM923;TP391

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0922-06

## Solar street lamp controller based on perturbation and observation method

YUAN Ke-jie<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, YE Rui-fang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of solar street lamp system, the maximum power point tracking (MPPT) method was applied to its controller. After the analysis of MPPT principle, specific methods to implement MPPT and drive Buck circuit were proposed. Also, by using AVR Studio program and Multisim and Proteus as the platform, a control system based on ATmega16 was finally built. On the basis of a simulation test that was passed, the experiment was conducted. The results show that the duty cycle of PWM waves is in accordance with the empirical value, which indicates that the solar panel charges the storage battery with maximum power, and the controller charges and discharges the battery in a scientific way.

**Key words:** street lamp controller; solar energy; maximum power point tracking (MPPT); perturbation and observation method; buck circuit drive

## 0 引 言

随着我国城市建设规模的不断扩大,我国路灯总数逐年递增,然而绝大多数路灯利用市电、采用高压钠灯,耗费大量的电能。太阳能是取之不尽、用之不竭的可再生能源,正得到迅速地推广应用<sup>[1]</sup>。市场上太阳能路灯控制器的种类有很多,根据其充电方式和控制策略的不同,可以分为以下4种<sup>[2]</sup>:

(1)并联型控制器。开关元件并联在太阳能电池板的两端,线路简单,价格便宜。其不足之处是:当蓄电池充满电且太阳能电池板还处于发电状态时,会导致太阳能电池板产生较大的短路电流。

(2)串联型控制器。开关元件串联在充放电回路中,起到防止过充电和过放电的保护作用。但该控制器存在充电方式单一的缺点。

(3)脉宽调制型控制器。它根据蓄电池电压设定

收稿日期:2013-12-03

作者简介:袁科杰(1989-),男,浙江宁波人,主要从事精密测量、机电一体化方面的研究。E-mail:yuankejie@gmail.com

通信联系人:王文,男,教授,硕士生导师。E-mail:wangwn@hdu.edu.cn

PWM 波占空比表,以相应占空比控制蓄电池的充、放电,具有充电快、延长蓄电池使用寿命的特点。但是当环境因素变化时,它不能动态地跟踪太阳能电池板的最大功率工作点,以致无法最高效率地利用太阳能。

(4)最大功率点跟踪型(MPPT)控制器。该控制器实时调节太阳能电池板的输出电压到最大功率点电压处,以使太阳能电池板输出功率达到最大值。其不足之处在于,驱动阻抗变换器需额外芯片,系统结构复杂,成本高。

采用 MPPT 方式的控制器,根据控制算法的不同又分为多种<sup>[3-4]</sup>。本研究通过对控制器的原理分析与电路仿真,提出一种基于干扰观测法的太阳能路灯系统。该控制器将 PWM 波发生、A/D 转换、系统控制等功能集成于 ATmega16 芯片中,与其他最大功率点跟踪控制器相比,具有结构简单、成本低等特点。

## 1 太阳能路灯系统总体设计

### 1.1 系统组成

研究的太阳能路灯控制器主要针对以发光二极管(LED)为光源的节能型低压直流路灯系统。

太阳能路灯系统由太阳能电池板(20 W,18 V)、控制器、蓄电池(12 V)、LED(4 W)组成,控制器结构如图 1 所示。控制器是整个太阳能路灯系统的控制部件,它控制太阳能电池板向蓄电池充电,同时控制蓄电池向 LED 供电,还担负着整个系统的实时状态检测和监控的任务。最有效地利用来自太阳能电池板的电能,又在充电过程中减少其对蓄电池的损伤,是控制器的核心功能。

### 1.2 控制器工作原理

太阳光照的强度直接关系到太阳能电池板的电压输出,因此可以通过检测太阳能电池板的输出电压来判断太阳光照的强度。黑夜时太阳能电池板的输出电压约为 3 V,控制器以太阳能电池板输出电压 3 V 作为启动 LED 开关的判断条件。当太阳能电池板输出电压大于 3 V 时,判定为白天,不需要打开 LED,太阳能电池板对蓄电池充电;当太阳能电池板输出电压小于等于 3 V 时,判定为黑夜,控制器打开 LED 开关,蓄电池放电点亮 LED。

结合以上工作原理,本研究提出了太阳能路灯控制器的硬件结构。

控制器通过蓄电池电压检测来辨别用何种方式让太阳能电池板给蓄电池充电。当蓄电池电压在 11.2 V ~ 13.6 V 之间,ATmega16 单片机打开 Buck 电路开关,同

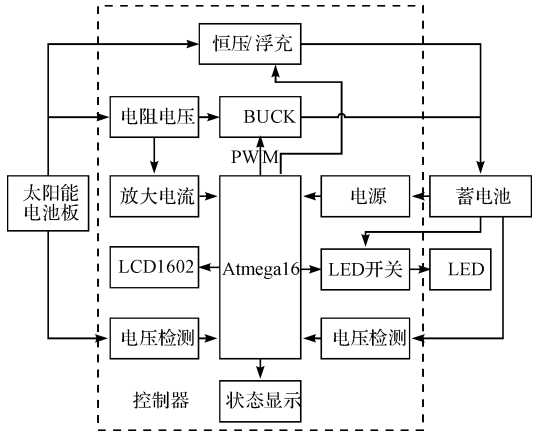


图 1 控制器结构

时检测该回路中精密电阻的电压,放大后换算成电流,与检测到的太阳能电池板电压乘积后计算出功率。根据前、后时刻的功率变化,ATmega16 输出占空比为相应大小的 PWM 波形,调节太阳能电池板的输出功率。当蓄电池电压在 13.6 V ~ 14.4 V 之间,单片机断开 Buck 电路开关,打开 15 V 恒压充电开关。当蓄电池电压在 14.4 V ~ 14.8 V 之间,单片机打开浮充开关。另外蓄电池经过电源模块转化为恒定的 5 V 电压,给 ATmega16 供电,同时 LCD1602 显示系统各个模块的状态。

## 2 最大功率点跟踪原理与硬件实现

### 2.1 最大功率点跟踪原理

在太阳能路灯系统中,太阳能电池板既非恒流源,又非恒压源<sup>[5-6]</sup>,它的内阻受到日照强度和温度等因素的影响。根据戴维宁定理,当负载电阻  $R$  与太阳能电池板等效内阻  $R_{eq}$  相等时,太阳能电池板输出功率最大,称之为最大功率点<sup>[7]</sup>。因此,为了使太阳能电池板在不同的日照强度和温度下,都能输出最大的功率,则太阳能电池板和负载之间必须加入一个阻抗变换器,如图 2 所示。

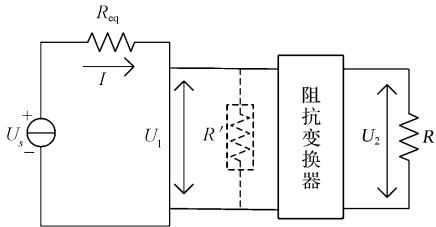


图 2 阻抗变换器

设变比  $n = U_2/U_1$ ,忽略开关损耗,阻抗变阻器的输入功率等于其输出功率, $U_1^2/R_{eq} = U_2^2/R$ ,可以得出  $n^2 R_{eq} = R$ ,调节变比  $n$  便可使太阳能电池板输入端的等效电阻  $R'$  等于电池板的等效内阻  $R_{eq}$ 。从而使太阳

能电池板在最大功率点工作,实现最大功率输出。

目前阻抗变换器一般使用 Buck 电路来实现,它是将某一直流电压变换为另一直流电压的电路。控制器通过改变 Buck 电路开关的占空比来调节变比  $n$ 。

## 2.2 Buck 电路

Buck 电路是一种单开关变换器,其电路组成如图 3 所示。如果开关  $S$  周期性导通、断开,即对输入电压进行斩波,便可在二极管的两端得到方波电压  $U_D$ 。经过电感滤波电路,将在输出端得到平稳的输出电压  $U_2$ 。控制开关  $S$  开通和断开的比例,就可以控制输出电压  $U_2$  的高低<sup>[8,9]</sup>。

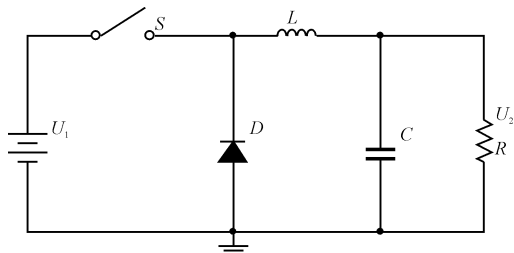


图 3 Buck 电路

设开关的周期为  $T$ , 开关的闭合导通时间为  $nT$ , 断开的时间为  $(1-n)T$ , 开关  $S$  闭合的时间与开关周期  $T$  的比例关系用占空比  $n$  表示。

由电感元件在稳态中的平衡规律知, 电感两端电压  $U_L$  在一周期内的平均值为零, 解得:

$$U_2 = nU_1 \quad (1)$$

另外滤波电感  $L$  为:

$$L = \frac{(U_1 - U_2)U_2}{\Delta I U_1 f} \quad (2)$$

电容  $C$  为:

$$C = \frac{(U_1 - U_2)U_2}{8\Delta U_c f^2 U_1 L} \quad (3)$$

式中:  $U_1$ —输入电压,  $\Delta I$ —峰-峰脉动电流,  $\Delta U_c$ —纹波电压,  $f$ —开关频率。

## 2.3 Buck 电路中元件选择

### 2.3.1 电感的选择

由式(2)可知,  $\Delta I$  越小,  $L$  越大; 同时  $f$  越大,  $L$  越小。电感的取值对 Buck 电路影响很大, 如果选得过大, 平波效果符合要求, 但动态效果比较差, 还会增加体积和成本; 如果选得过小, 虽然动态效果良好, 但是电流不连续, 不符合要求。

当电流工作在连续状态时, 临界电感为:

$$L = \frac{(U_1 - U_2)U_2}{\Delta I U_1 f} = \frac{(18 - 12) \times 12}{2 \times 1.14 \times 18 \times 10^5} = 17.5 \text{ mH} \quad (4)$$

为了保证电感工作在连续状态, 取  $L = 47 \text{ mH}$ 。

### 2.3.2 电容选择

由式(3)可知,  $C$  越大,  $\Delta U_c$  越小, 取纹波电压  $\Delta U_c$  为输出电压的 0.5%, 电容为:

$$C = \frac{(U_1 - U_2)U_2}{8\Delta U_c f^2 U_1 L} = \frac{(18 - 12) \times 12}{8 \times (12 \times 0.5\%) \times 10^{10} \times 18 \times 47 \times 10^{-6}} = 18 \mu\text{F} \quad (5)$$

为了保证波纹度更小, 实际使用的电解电容容量比计算得的电容容量大, 取  $C$  为  $100 \mu\text{F}$ 。

### 2.3.3 开关选择

开关选用 P 沟道型的 IRF9640, 场效应管 (MOSFET) 具有开关速度快、高频性能好、输入阻抗高、驱动功率小等优点。

## 2.4 MOSFET 的驱动

### 2.4.1 驱动能力

假定驱动是理想脉冲源, 那么其驱动能力无穷大, 可以提供任意大小的电流。但实际中, 驱动存在内阻, 如果其内阻为  $5 \Omega$ , 在  $5 \text{ V}$  电压下, 电路最大电流为  $1 \text{ A}$ , 则可认为其驱动能力为  $1 \text{ A}$ 。

通常驱动器和 MOSFET 的 G 极之间, 需串接一个电阻。驱动电阻的作用: 如果驱动导线很长, 驱动电阻可对导线电感和 MOSFET 结电容引起的振荡起阻尼作用, 并且调节驱动器的驱动能力和开关速度。驱动电阻 ( $R_1$ ) 的接法如图 4 所示。

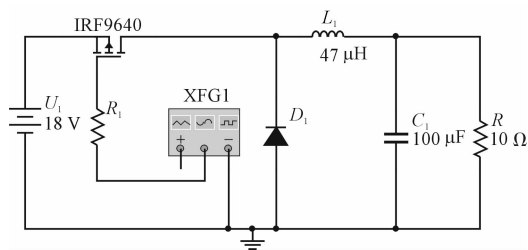


图 4 驱动电阻  $R_1$  接法

### 2.4.2 寄生电容

MOSFET 与三极管相比, 一般认为使其导通不需要电流, 只需  $U_{GS}$  达到一定的值就可以。但在实际中, 还需要速度。

MOSFET 在制造过程中, 由于制造工艺的限制, 3 个极之间会产生的寄生电容如图 5 所示。MOSFET 的驱动实际上是对电容进行充、放电。另外, 寄生电容的存在导致在设计驱动电路时需考虑更多的因数。

## 2.5 理想脉冲源驱动的 Buck 电路

本研究在 Multisim 平台下根据上述计算结果所建立的理想脉冲源驱动的 Buck 模型如图 6 所示。该模

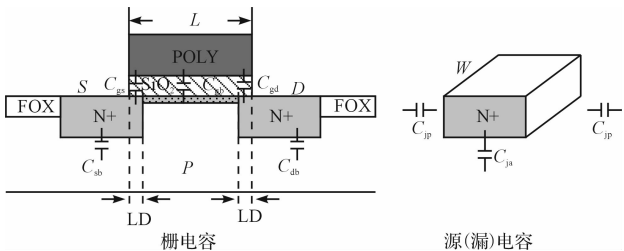


图5 寄生电容

型主要包括电源、PMOS 管、电感、电容、二极管、PWM 波发生器、负载,并且用虚拟示波器显示不同占空比时的输出电压  $U_2$ 。

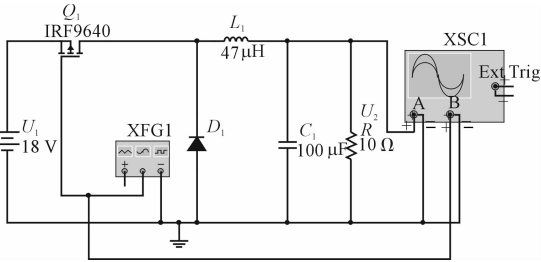


图6 理想脉冲源驱动的理想 Buck 模型

观察结果表明,Buck 电路的输出电压  $U_2$  与占空比成  $n$  线性关系,如图 7 所示。

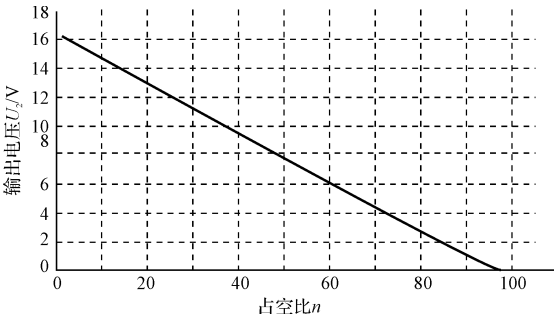


图7 理想 Buck 模型中占空比  $n$  与输出电压  $U_2$  关系

2.6 Buck 电路自举

根据 IRF9640 的中文手册,当 PMOS 管截止时,  $U_{GS}=0$ ;当 PMOS 管完全导通时,  $U_{GS} \leq -10\text{ V}$ ,设计电路如图 8 所示。

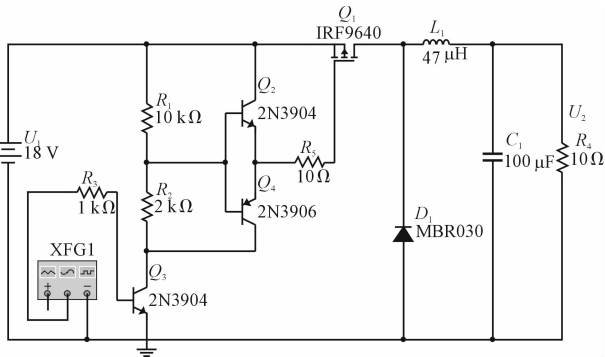


图8 Buck 自举电路

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_1 = \frac{2}{10 + 2} \times 18 = 3\text{ V} \quad (6)$$

当 PWM 发生器输出高电平时,  $Q_3$  导通,由于  $Q_2$  导通,又因为  $Q_2$  为发射极输出,放大倍数为 1,  $U_{Q4} = U_{R2} = 3\text{ V}$ ,  $U_{GS} = -15\text{ V} < -10\text{ V}$ ,PMOS 管导通。

当 PWM 发生器输出低电平时,  $Q_3$  截止,  $U_{Q4} = U_{R2} = 18\text{ V}$ ,PMOS 管截止。不同占空比时输出电压  $U_2$  如表 1 所示。

表 1 自举电路中占空比  $n$  与输出电压  $U_2$  的关系

| $n$            | 1     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_2/\text{V}$ | 0.86  | 3.01  | 4.78  | 6.54  | 8.31  | 10.2  |
| $n$            | 60    | 70    | 80    | 90    | 99    | 100   |
| $U_2/\text{V}$ | 12.04 | 13.80 | 15.55 | 17.30 | 17.35 | 17.35 |

由表 1 知:  $U_1$  与  $U_2$  在占空比 0 ~ 99 之间时,  $U_2$  随占空比  $n$  的增加而增加。根据简化公式:

$$U = \frac{1}{C} \int Idt \quad (7)$$

式中:  $C$ —MOSFET 寄生电容,  $I$ —驱动电流。

电流越大,达到  $U_{GS(th)}$  所需时间越短,开关波形上升和下降陡度越急剧。占空比为 5% 时 PMOS 管的驱动效果如图 9 所示。实际 Buck 电路(最大功率点跟踪电路)的设计如图 10 所示。

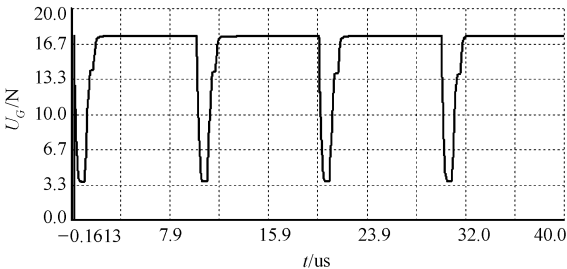


图9 占空比为 5% 时 PMOS 管的驱动效果

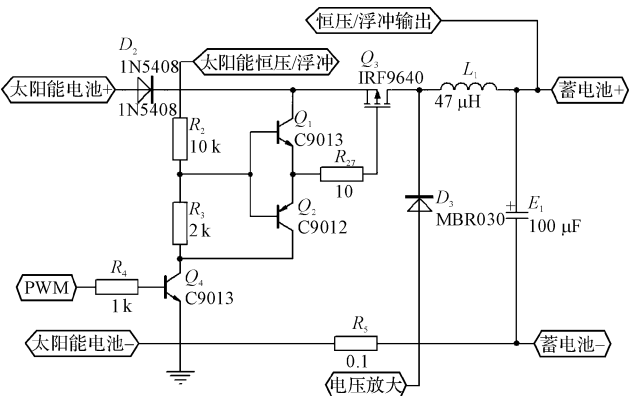


图10 最大功率点跟踪电路

3 程序设计

3.1 充、放电判断程序设计

控制器通过对太阳能电池板、蓄电池的电压检测,使采集的数据与设定电压值比较,作出科学的充、放电

判断。流程如图 11 所示。

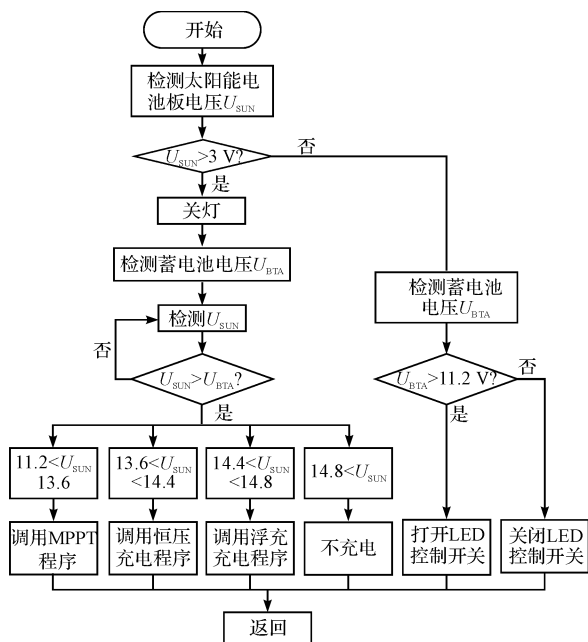


图 11 充、放电判断流程图

### 3.2 PWM 程序设计仿真

ATmega16 单片机内部有多路 PWM 模块<sup>[10]</sup>，通过初始化设置输出 PWM 波形后，只有在改变占空比时，才需占用 CPU 资源。在 Proteus 平台上，PWM 波仿真如图 12 所示。充电时，PWM 波采用受定时器 T1 控制的 OC1B，即 PD4，同时设定快速 PWM 模式。计算公式为：

$$TOP = \frac{f_{clk\_10}}{f_{PWM} \times N} - 1 = \frac{7\,372\,800}{100 \times 10^3 \times 1} - 1 \approx 73 \quad (8)$$

式中： $N$ —分频因子， $TOP$ —最大计数值， $f_{clk}$ —系统时钟， $f_{PWM}$ —开关频率。

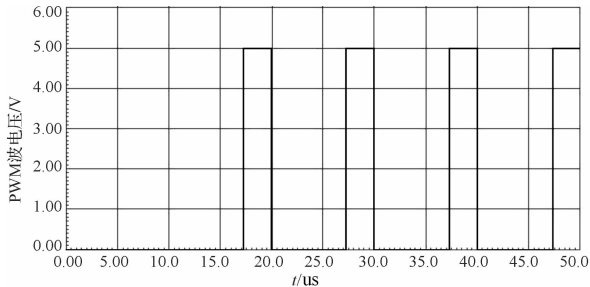


图 12 PWM 仿真

在图 12 中，PWM 波形周期 10  $\mu$ s，即 100 kHz。通过设置不同的 OCR1B 值，可输出相应的占空比。

### 3.3 最大功率点跟踪程序设计

在太阳能路灯系统中，要提高太阳能电池板的能源被利用的效率，必须实时检测太阳能电池板的输出功率，通过程序控制，使太阳能电池板一直处于最大功率点附近。

MPPT 实际上就是一个自动寻找最大功率点的过程。太阳能电池板输出功率特性如图 13 所示，当负载特性与太阳能电池板工特性的交点在最大功率点之左时，MPPT 使交点处的电压升高；而当交点在最大功率点之右时，MPPT 使交点处的电压减小，本研究采用经典的干扰观测法，通过改变占空比，从而改变电压值，控制流程如图 14 所示。

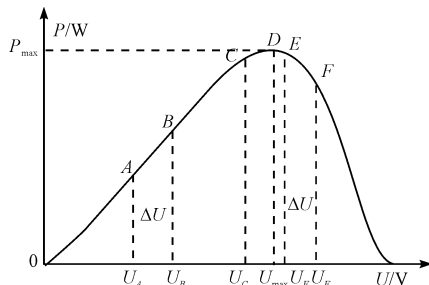


图 13 太阳能电池板输出功率特性

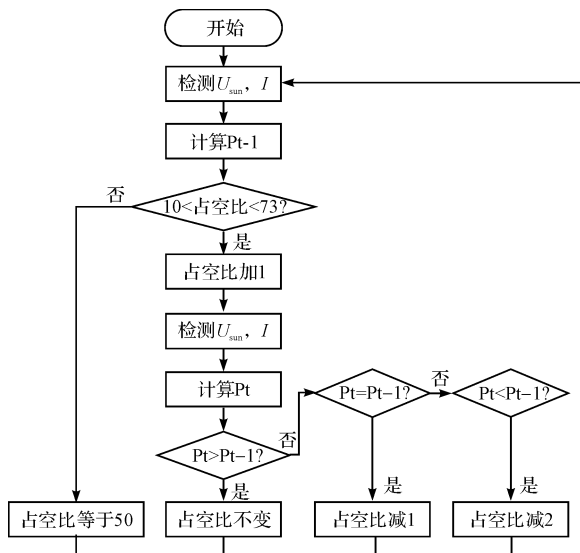


图 14 最大功率点跟踪控制流程图

### 3.4 电压检测、功率计算程序设计

电压检测主要利用 ATmega16 的 3 路内置 A/D 转换器，分别检测太阳能电池板输出电压、蓄电池电压、充电回路中精密电阻的放大电压。本研究使用 T2 定时器的中断触发 A/D 中断，逐次对 3 路 A/D 进行采样，控制流程如图 15 所示。在 A/D 中断程序里计算太阳能电池板输出功率，即太阳能电池板输出电压与充电回路电流的乘积。A/D 转换公式为：

$$ADC = \frac{V_{IN} \times 1\,024}{V_{REF}} \quad (9)$$

式中：基准电压  $V_{REF}$ —2.56 V。

## 4 实验结果

在 11:00AM，太阳能电池板光照情况下，LCD1602

数据显示如图 16 所示。其中太阳能电池板电压 S: 13.47 V; 蓄电池电压 B: 12.23 V; 充电电流 CU: 0.34 A; 占空比 SCALE: 58。由式(8)知,占空比最大值为 73,因此  $\eta = 58/73 = 0.79$ ,符合经验值  $\eta \in (0.7 \sim 0.8)$ ,说明太阳能电池板在当前条件下以最大功率的方式输出,其他数据如表 2 所示。

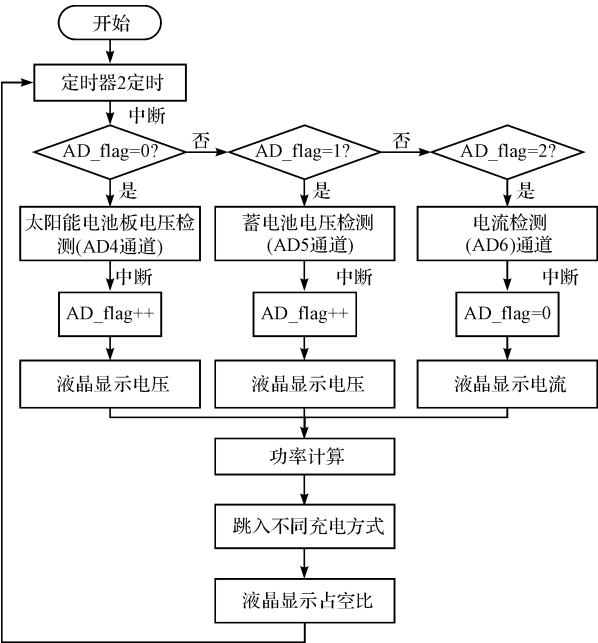


图 15 电压检测、功率计算程序流程图

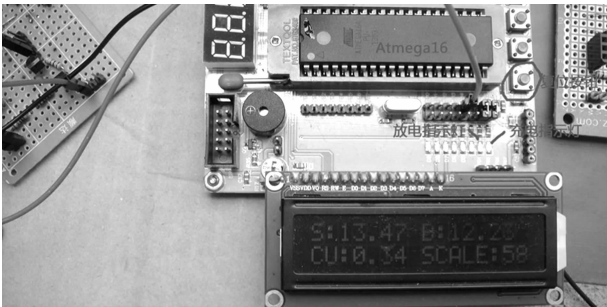


图 16 实物测试

表 2 太阳能路灯控制器测试数据

| $U_{\text{sun}}/\text{V}$ | $U_{\text{BTA}}/\text{V}$ | $I/\text{A}$ | $n$ | $\eta$ |
|---------------------------|---------------------------|--------------|-----|--------|
| 13.00                     | 12.26                     | 0.15         | 58  | 0.79   |
| 13.08                     | 12.26                     | 0.29         | 60  | 0.82   |
| 13.44                     | 12.18                     | 0.22         | 59  | 0.81   |
| 13.47                     | 12.23                     | 0.34         | 58  | 0.79   |
| 13.50                     | 12.04                     | 0.19         | 58  | 0.79   |
| 12.70                     | 12.29                     | 0.20         | 60  | 0.82   |
| 13.06                     | 12.23                     | 0.19         | 58  | 0.79   |

5 结束语

笔者研究了一种简易的太阳能路灯控制器,该控制器以 Buck 电路作为阻抗变换器,采用经典的干扰观测算法实行跟踪控制,利用最大功率方式对蓄电池充电,以科学的充、放电管理方式保护蓄电池的使用寿命。最后,经过测试,在试验条件下,控制器可使太阳能电池板以最大功率方式对蓄电池充电,证明了系统方案设计与电路具体实现的正确性、合理性。

本研究涉及的相关内容可应用于阻抗变换、蓄电池充放电管理、太阳能路灯照明系统等领域。

参考文献(References):

[1] 吴理博,赵争鸣,刘建政.用于太阳能照明系统的智能控制器[J].清华大学学报:自然科学版,2003,43(9):1195-1198.

[2] 刘鑫.太阳能路灯系统控制器研究及设计[D].青岛:中国海洋大学信息科学与工程学院,2011.

[3] 陈剑,赵争鸣,袁立强,等.光伏系统最大功率点跟踪技术的比较[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(5):700-704.

[4] 李晶,张维戈,王健强.基于PIC单片机的太阳能路灯控制器[J].微计算机信息,2009(20):51-52.

[5] 王玉玲,孙以泽,彭乐乐,等.基于 Lambert W 函数的太阳能电池组件参数确定法[J].物理学报,2012(24):533-538.

[6] LEYVA R, ALONSO C, QUEINNEC I, et al. MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1):249-258.

[7] KAWAMURA T, HARADA K, ISHIHARA Y, et al. Analysis of MPPT characteristics in photovoltaic power system[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 47(1-4):155-165.

[8] 朱光辉,侯振义.一种铅酸蓄电池脉冲修复充电电路研究[J].电源技术,2011(9):1090-1094.

[9] 刘树林,刘健,寇蕾,等.Buck DC/DC 变换器的输出纹波电压分析及其应用[J].电工技术学报,2007(2):91-97.

[10] 刘海成. AVR 单片机原理及测控工程应用基于 ATmega48/ATmega16[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.

[编辑:李辉]

本文引用格式: