

# 基于LED光供电的高压设备温度在线监测系统

康荣波<sup>1</sup>, 杨明发<sup>2</sup>

(1. 福建省电力有限公司龙岩供电公司, 福建 龙岩 364000; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116)

**摘要:** 针对高压设备无线测温装置供电困难问题,设计了一种由低压侧LED光源供电的新型温度在线监测系统。系统使用LED所产生的光能经太阳能电池光电转换后为高压侧无线测温装置供电,以保证其可靠运行。设计了LED两级可PWM调光恒流驱动电路,为LED提供了恒定电流的同时保证了输入端高功率因数。无线测温装置利用热敏电阻PT1000采集温度信号,并通过ANT无线模块进行数据传输,兼具高精度测量和低功耗优势。实验测得无线测温装置在3.3 V供电电压下的平均消耗电流约7.24 mA,驱动电路在满PWM占空比下输出电流为584 mA,在70%PWM占空比下的工作状态为兼顾高压侧电路可靠运行与节约电能的最佳状态。

**关键词:** LED光源; 温度在线监测; 两级可PWM调光恒流驱动

## On-line Temperature Monitoring System for High-voltage Equipment Based on LED Light Energy

KANG Rongbo<sup>1</sup>, YANG Mingfa<sup>2</sup>

(1. Longyan Power Supply Company, Fujian Electric Power Company Limited, Fujian Longyan 364000, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** For power supply of wireless temperature measuring device of high-voltage equipment, a new on-line temperature monitoring system powered by low-voltage LED light was designed. A solar cell was used to convert LED light energy to electric energy for reliable operation of the high-voltage wireless temperature measuring device. A two-stage PWM dimming constant current LED driver was designed to provide constant current for LED and ensure high power factor at input terminal. Temperature signals are collected with thermistor PT1000 and transmitted with ANT wireless communication module in the wireless temperature measuring device, which has the advantages of high precision and low power. Experiments show that the average current consumption of the wireless temperature measuring device is 7.24 mA under 3.3 V voltage, and the output current of the driver is 584 mA with PWM's full duty cycle. The working condition with 70% of PWM's duty cycle is the best condition, in which reliable operation of high-voltage circuit and power saving are balanced.

**Key words:** LED light; on-line temperature monitoring; two-stage PWM dimming constant current drive

## 0 引言

高压设备是电力系统运行的重要组成部分,当电网负荷过高时,其内部电气接点在长时间运行过程中易出现接触电阻增大、局部温升过高。过高的温升又将导致设备内部绝缘老化和损坏,严重时会造成短路故障,如果对温度的监测不到位,不仅会

引起断电、停电等事故,甚至有可能引起设备损坏、火灾等安全事故。因此有必要对运行中的高压设备内部各电气接点温度进行实时有效的在线监测,以保证其稳定、可靠运行。

在温度在线监测过程中,温度传感器往往直接埋置于高压系统中,为了解决测温设备在高电压下的电气绝缘问题,在设计中需考虑以下两个技术难点:高压侧无线测温装置的通信绝缘问题和电源获

收稿日期:2016-07-26; 修回日期:2016-09-11

基金项目:福建省自然科学基金(2012J05086)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(2012J05086).

取问题。前者目前较多采用无线射频通信或光纤通信解决,针对后者,目前较为常用的方式有取能电流互感器(CT)供电<sup>[1-3]</sup>、电容分压供电<sup>[4-5]</sup>、无线电能传输<sup>[6-7]</sup>、激光供电<sup>[8-10]</sup>。其中,取能CT供电方式存在工作死区,当母线电流过小时无法提供足够的能量,该方式一般与蓄电池组配合使用。电容分压供电的优点是结构简单,但存在高压系统与取能电路之间的绝缘问题。无线电能传输技术近年来发展较快,将其应用于在线监测装置的取能中具有革新意义,但其产生的电磁场能量有可能对设备内部其他装置产生干扰。

激光供电是目前应用较为广泛的供电方式,早在1992年,ABB公司就将该供电方式应用于实际场合<sup>[11]</sup>。该方式的优点是能提供稳定的电能,但其所使用的大功率激光器价格昂贵,且激光二极管的工作寿命有限,若长时间工作在驱动电流比较大的状态,容易发生退化现象导致工作寿命迅速降低<sup>[12]</sup>。因此急需寻找另外一种低成本、高寿命的人造光源代替激光光源,文[13]采用低压侧的小容量聚光灯将光能量通过太阳能电池转换为电能为后端装置供电。考虑到白炽灯的光谱与太阳光谱接近,且同时具有驱动简单、价格便宜等优势,一般选择白炽灯光源作为低压侧聚光灯,但该光源仍存在难以散热、使用寿命低等问题。

相比于激光光源和白炽灯光源,LED光源兼具高寿命(理论寿命达十万小时)、低成本、易散热等优势,且由于目前低功耗技术已较为成熟,LED光源所提供的能量足够保证高压侧无线测温装置的稳定运行。笔者在LED光供电的基础上,设计了高压设备温度在线监测系统,主要介绍了LED光源的两级可PWM调光恒流驱动电路及高压侧无线测温装置。

## 1 系统结构

系统结构见图1,温度传感器采用热敏电阻PT1000,将其直接埋置于被测高压系统表面,高低压侧单片机型号均采用Microchip公司的PIC16F1829。采集到的温度信息通过信号处理电路传至高压侧单片机,然后高压侧单片机通过ANT无线通信模块将采集到的温度信息传输至低压侧,最后低压侧单片机将收到的温度信息通过RS232接口传至上位机。电源方面,由低压侧的两级可PWM调光恒流电路同时驱动7个串联的LED灯珠,采取一定聚光措施后,其光能量通过太阳能电池及稳压模块转换为稳定的电能量并为高压侧电路供电。同时,低压侧

单片机能通过两级电路中BUCK降压恒流模块的PWM调光口控制LED光源的通断,当需要时输出相应PWM信号即能接通LED光源,当不需要时只需输出低电平信号切断光源,系统结构简单,控制方便。

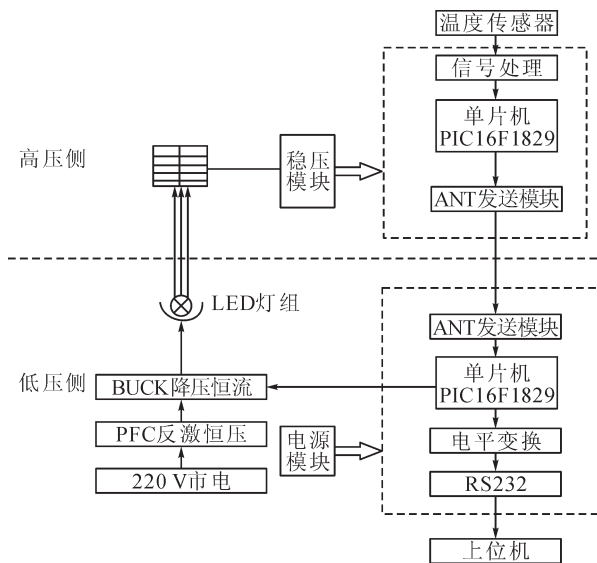


图1 系统结构

Fig. 1 System structure

## 2 两级可PWM调光恒流驱动电路

由于LED与普通整流二极管的伏安特性曲线相似,其电压微弱的变化就有可能导致电流产生极大的变化,进而影响其使用寿命,因此对LED需采用恒流驱动方式。此外,由于驱动电路中的整流桥与滤波电容都是非线性器件,使得交流电源输入电流中含有大量的谐波,谐波电流对电网会造成严重的危害,因此必须对驱动电路进行功率因数校正(PFC)以最大限度降低其对电网的污染。文中采用前级PFC反激恒压和后级BUCK降压恒流的两级驱动策略,前级电路自带功率因数校正功能,后级电路带PWM调光功能,通过调光接口不仅能够随时通断光源,更能根据装置实际工作情况调节输出电流,大大增强了装置的可靠性。

### 2.1 PFC反激恒压驱动

驱动方案图见图2。交流市电经过整流滤波后进入高频变压器,输出端电压信号反馈给恒压和PFC控制器,控制器根据输入的交流信号与输出电压信号控制开关管通断,从而实现电路的能量传递。

#### 2.1.1 设计原理

驱动电路采用峰值电流控制法进行功率因数校正,工作于临界导通模式,其控制芯片选用意法半导体(ST)公司的L6562,芯片内置高线性乘法器以

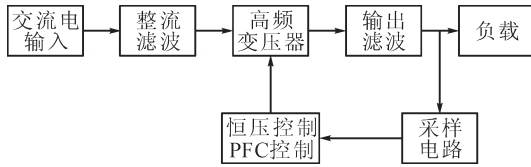


图 2 反激恒压驱动电路结构框图

Fig. 2 Structure diagram of flyback constant-voltage circuit

及电压误差放大器,能精确控制输出电压。

电路拓扑见图 3,当开关管  $Q_1$  导通时,交流电压经过整流桥与滤波电容形成类正弦电压,并加在高频变压器  $T_1$  的原边绕组上,同时绕组电流线性增加,副边电路的整流二极管  $D_3$  截止,变压器储能;当

检测电阻  $R_8$  两端电压达到 L6562 的 CS 引脚参考电压时,开关管  $Q_1$  关断,副边整流二极管  $D_3$  导通,高频变压器  $T_1$  将储存的能量通过副边绕组为后端负载供电,当 L6562 的 ZCD 引脚检测到变压器完全退磁后,开关管  $Q_1$  再次导通,为变压器储能,以此往复。其中,电阻  $R_9$ 、电容  $C_5$  及整流二极管  $D_1$  组成 RCD 的钳位电路能吸收漏感尖峰以保护开关管  $Q_1$  不受损坏;采用辅助绕组为 L6562 供电以避免电路外接直流源;由电阻  $R_{13}$ 、 $R_{15}$  分压后电阻  $R_{15}$  两端的电压与可调基准源 TL431 内部 2.5 V 参考电压比较,误差信号再通过光耦器件 PC817A 传至控制芯片的 INV 引脚,实现电压反馈。

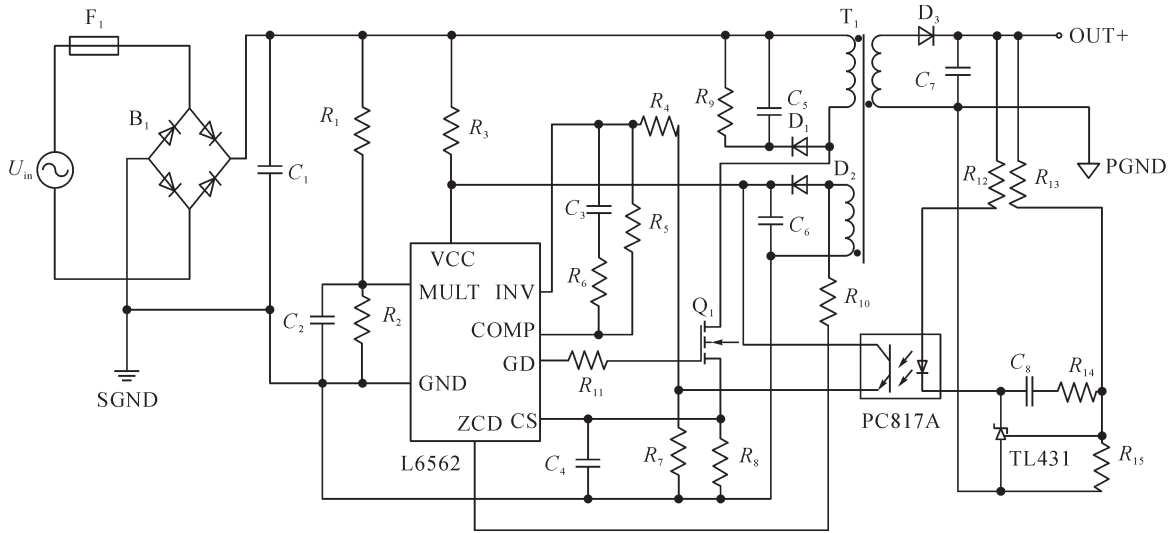


图 3 基于 L6562 的反激恒压电路

Fig. 3 Flyback constant-voltage circuit based on L6562

### 2.1.2 高频变压器设计

高频变压器的设计是驱动电路的关键,主要包括磁心截面积  $A_e$ 、气隙长度  $l_g$ 、原边绕组匝数  $N_p$ 、副边绕组匝数  $N_s$  及辅助绕组匝数  $N_f$ 。

根据实际应用要求,电路设计规格为:交流电压输入 200~240 V,输出电压 28.5 V,额定负载 20 W。预设参数包括反射电压  $U_R=205$  V,效率  $\eta=80\%$ ,最小开关频率  $f_{smin}=57$  kHz。由于文中选取 EI28 磁心,可得  $A_e=86$  mm<sup>2</sup>,假设线路压降为 4 V,则由以上参数可得最小输入峰值电压  $U_{pkmin}=278.8$  V、输入功率  $P_{in}=25$  W,峰值反射电压比为

$$K_V = \frac{U_{pkmin}}{U_R} = 1.36. \quad (1)$$

文中引入特征函数为<sup>[14]</sup>

$$F(x) = \frac{0.5 + 1.4 \times 10^{-3} \times x}{1 + 0.815 \times x}. \quad (2)$$

一次侧电流峰值为

$$I_{pkp} = \frac{2 \times P_{in}}{U_{pkmin} \times F K_V}. \quad (3)$$

高频变压器的原边电感、气隙长度、原边绕组匝数、副边绕组匝数和辅助绕组匝数分别由式(4)–(8)给出:

$$L_p = \frac{U_{pkmin}}{(1 + K_V) \times f_{smin} \times I_{pkp}}; \quad (4)$$

$$l_g = \frac{0.4 \times \pi \times L_p \times I_{pkp}^2}{A_e \times \Delta B^2} \times 10^8; \quad (5)$$

$$N_p = \frac{\Delta B \times l_g}{0.4 \times \pi \times I_{pkp}}; \quad (6)$$

$$N_s = \frac{N_p \times (U_0 + U_F)}{U_R}; \quad (7)$$

$$N_f = \frac{U_f}{U_0 + U_F} \times N_{S0}. \quad (8)$$

式(4)–(8)中: $U_0$ 为输出电压; $U_F$ 为整流二极管(文中用肖特基二极管) $D_3$ 的导通电压,取 0.6 V; $U_f$ 为 L6562 的供电电压,取 15 V; $\Delta B$ 为磁通密度最

大值,取 1 950 GS。由式(2)-(8)可算得  $l_g=0.06$  cm、 $N_p=124$  匝、 $N_s=18$  匝、 $N_f=10$  匝。

## 2.2 BUCK 降压恒流驱动

驱动芯片采用美国国家半导体公司的 LM3404 HV,其自带 PWM 调光接口,内置  $N$  通道 MOS 开关管,采用恒定导通时间(COT)控制,主电路见图 4。当开关管导通时输入电压给储能电感  $L_1$  及后端负载充电,当开关管关断时储能电感通过整流二极管  $D_4$  续流继续给负载供电。开关管导通恒定时间后自动关断,当芯片 CS 引脚检测到电阻  $R_{17}$  两端电压低于 200 mV 时开关管再次导通,以此实现电流反馈,单片机通过将 PWM 信号输入到 DIM 引脚来调节输出电流大小。

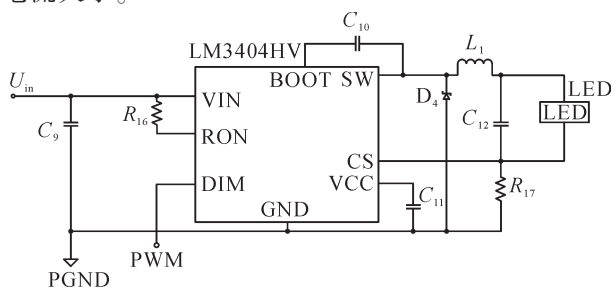


图 4 基于 LM3404HV 的 BUCK 降压恒流电路

Fig. 4 BUCK step-down constant-current circuit based on LM3404HV

LM3404HV 的开关频率由开启电阻  $R_{16}$  及输出电压  $U_0$  决定,其工作频率及导通时间为:

$$f_{sw} = \frac{U_0}{1.34 \times 10^{-10} \times R_{16}}; \quad (9)$$

$$t_{on} = \frac{1.34 \times 10^{-10} \times R_{16}}{U_{in}}. \quad (10)$$

电感电流纹波值与最小电感值的关系为

$$\Delta i_L = \frac{U_{in} - U_0}{L_{min}} \times t_{on}. \quad (11)$$

采样电阻  $R_{17}$  计算公式为

$$R_{17} = \frac{0.2 \times L}{I_0 \times L + U_0 \times t_{SNS} - \frac{U_{in} - U_0}{2} \times t_{on}}. \quad (12)$$

式(10)-(12)中:  $U_{in}$  为输入电压;  $I_0$  为输出电流;  $t_{SNS}=220$  ns,为芯片内 CS 比较器传播延时时间。

文中负载为 7 个串联的 LED 灯,其中每个 LED 灯导通电压约 3.3 V,算得输出电压  $U_0 \approx 23$  V;并预设输入电压  $U_{in}=28.5$  V,恒流值  $I_f=600$  mA,开关频率  $f_{sw}=252$  kHz。由式(9)、(10)得  $R_{16}=680$  k $\Omega$ ,  $t_{on}=3.18$   $\mu$ s。电感电流纹波取输出电流的 6%,约为 36 mA,代入式(11),得  $L_{min}=422$   $\mu$ H,取  $L=450$   $\mu$ H,并代入式(12),得  $R_{17}=0.33$   $\Omega$ 。

## 3 高压侧无线测温装置

### 3.1 温度传感器

采用 PT1000 铂电阻作为温度传感器,其具有温度系数分散性小、线性度好、性能稳定等优点,将其埋置于高压设备内部被测体表面,能够准确、快速测得其温度信号。在 0~850  $^{\circ}$ C 范围内,其电阻与温度的关系为  $R_t=R_0(1+At+Bt^2)$ 。其中  $R_0=1\,000$   $\Omega$  为 0  $^{\circ}$ C 时阻值,  $R_t$  为  $t$   $^{\circ}$ C 时阻值,电阻与温度呈近似线性关系。

由于 PT1000 得到的信号较弱,需要将温度信号转换成对应的 0~3.3 V 电压信号再经单片机 A/D 模块转换成数字信号,文中采用如图 5 所示的非平衡电桥作为信号处理电路。令图 5 中  $R_1=R_7$ 、 $R_2=R_6$ ,可得输出电压为

$$U_t = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times \left(\frac{3.3}{R_9 + R_1} \times R_1 - \frac{3.3}{R_5 + R_4} \times R_4\right). \quad (13)$$

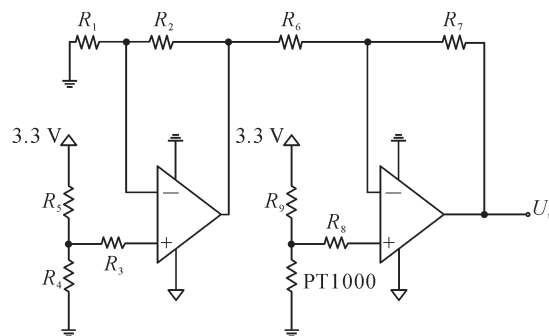


图 5 信号处理电路

Fig. 5 Signal processing circuit

由式(13)可知,输出电压与电阻之间也呈近似线性关系,为了尽量减小非线性误差,  $R_9$  的取值应尽可能大。文中实验测得在 0~150  $^{\circ}$ C 范围内电路输出电压的温度特性曲线见图 6。在单片机程序中采用分段线性插值法克服非线性误差来计算各点温度值,既降低成本又能满足精度要求。

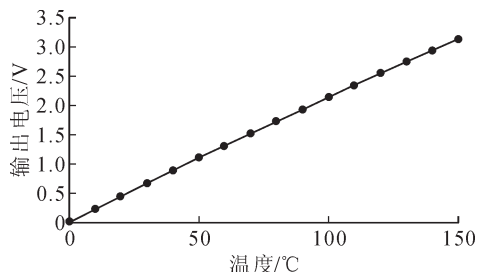


图 6 信号处理电路输出电压的温度特性

Fig. 6 Temperature characteristic of signal processing circuit's output voltage

### 3.2 ANT 无线通信模块

除了电源外,测温装置的通信绝缘也是在线监测系统可靠运行的关键。ANT 无线网络是 Nordic、Dynastream 等公司推动的超低功耗无线网络标准,可以完成 zigbee 的大多数应用场景,相比于 zigbee 最大的优势在于其具有更低的功耗。由于太阳能电池的光电转换效率较低,这就对高压侧无线测温装置的低功耗技术提出了更高的要求,而无线通信的功耗占了电路整体功耗的大部分,因此 ANT 无线网络显然比 zigbee 更适于文中装置的要求。

文中选用 ANT 协议的 nRF24AP2 无线射频芯片,芯片已将相关的无线网络协议、抗干扰协议、超低功耗电源管理等完全封装于内部。软件应用无需关注无线协议细节,只需根据 ANT 协议消息结构对芯片进行网络配置即可建立通信<sup>[15]</sup>。

## 4 系统实验

高压侧无线测温装置采取间歇性工作方式,每隔 1 ms 更新一次数据,其余时间处于休眠模式,软件流程见图 7。单片机完成初始化后打开 ANT 通道,与低压侧接收机建立通信,单片机采样温度信号、计算并刷新温度值、通过 ANT 发送数据,随后单片机进入低功耗休眠模式,定时时间到后唤醒单片机,进行下一轮温度采集。装置由稳压芯片 LM1117-33 提供 3.3 V 供电电压,供电电压下测得其平均消耗电流 7.24 mA。

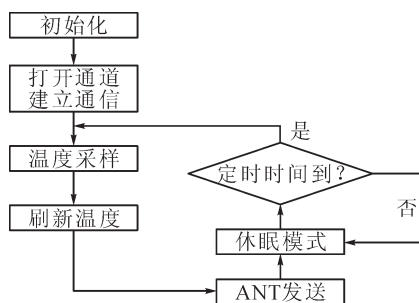


图 7 高压侧无线测温装置软件流程

Fig. 7 Software process of high-voltage wireless temperature measuring device

对前级 PFC 反激恒压电路进行恒压实验测试,在满载条件下,电路输出电压随输入电压的变化情况见图 8。可知,当输入电压大于 120 V 后,输出电压基本不变,保持了良好的恒压特性。

在 220 V 工频交流输入电压、7 个串联的 700 mA/3 W 白光 LED 灯珠负载及 PWM 满占空比条件下,对所设计的两级可 PWM 调光恒流驱动电路进行实验测试。前级电路的输入端波形和输出电压波形见

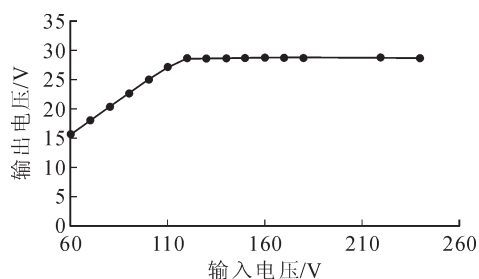


图 8 PFC 反激恒压电路的恒压特性

Fig. 8 Constant-voltage character of PFC flyback constant-voltage circuit

图 9、10。由图 9 可知,输入电流为正弦波,且与输入电压基本同相位,较好跟随了输入电压的变化,从而提高了功率因数,经测试,此时 PF 值为 98.7%;由图 10 可知,输出电压为 28.55 V 且电压纹波仅 1.4 V,为后级电路提供了良好的输入环境。

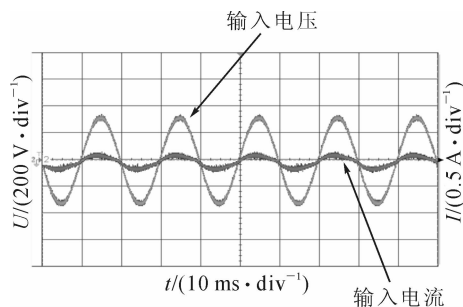


图 9 PFC 反激恒压电路的输入电压、电流

Fig. 9 Input voltage and current of PFC flyback constant-voltage circuit

后级电路的输出波形见图 11。此时电感电流纹波约 30 mA,输出电流为 584 mA、输出电压为 23.5 V,基本符合设计参数值。

由于文中测温对象为额定电压 10 kV、额定电流 600 A 的高压设备内部电缆接头,其对地最小绝缘距离是 12.5 cm,考虑一定安全裕量,将 LED 光源安装于距无线测温装置 20 cm 处。

综合考虑转换效率和使用成本,使用面积为 25 cm² 的多晶硅太阳能电池进行光电转换。经测试,在 PWM 满占空比时的 LED 光照强度下,太阳能电池的空载电压为 4.9 V,短路电流达到 80 mA,此时外接无线测温装置即可正常供电,但若驱动电路长期工作于满占空比状态将会造成严重的电能浪费。

经实验,在驱动电路平均输出电流达到 380 mA 时,所产生光能量刚好足够保证无线测温装置稳定运行,此时 LED 光源输出功率约 5.8 W,对应的太阳能电池输出功率约 36 mW,可算得光电能量传递效率  $\eta \approx 0.62\%$ 。该效率低于文[16]中激光供电的效

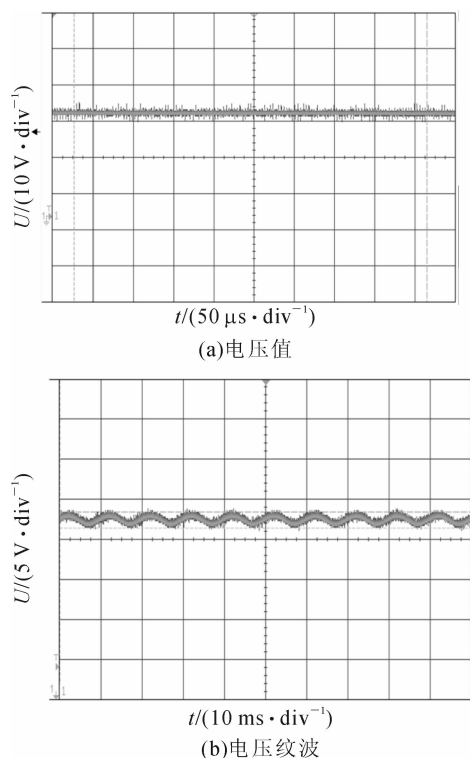


图 10 PFC 反激恒压电路输出电压波形  
Fig. 10 Out voltage of PFC flyback constant-voltage circuitback

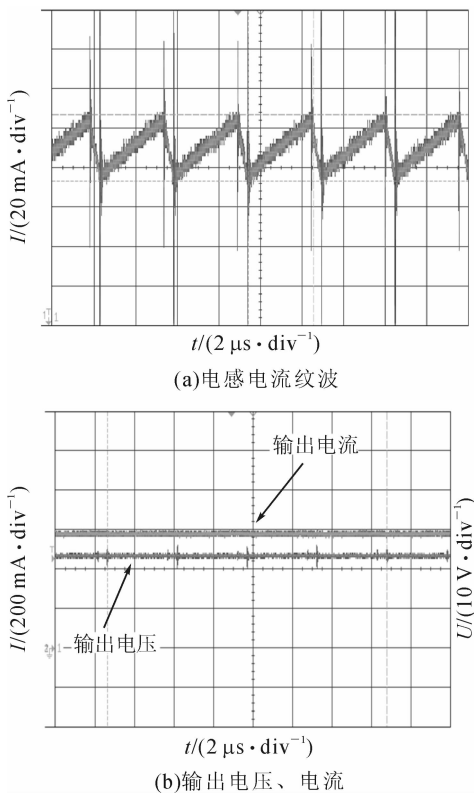


图 11 BUCK 降压恒流电路的输出波形

Fig. 11 Output waveform of BUCK step-down constant-current circuit

率,主要考虑以下原因:①在能量密度  $1\,000\text{ W/m}^2$

的自然光光照条件下,多晶硅太阳能电池的转换效率仅为  $12\%$ <sup>[17]</sup>,而低压侧人造光源产生的光能量较弱,硅系太阳能电池在弱光条件下的转换效率会进一步大幅降低;②LED 光谱波长分布约为  $460\,636\text{ nm}$ ,而多晶硅太阳能电池的光谱峰值响应波段为  $800\,950\text{ nm}$ <sup>[17]</sup>,电池对 LED 光源的吸收效率不高;③在绝缘距离范围内的光传输过程及终端的聚光光圈均会造成一部分光能量流失。

留一定裕量后,选取电路工作于 70% 的 PWM 占空比,其对应的波形见图 12,此时平均输出电流  $413\text{ mA}$ ,为驱动电路工作的最佳状态。

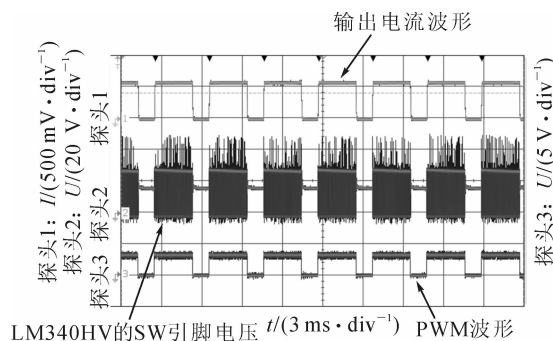


图 12 PWM 调光引脚 70% 占空比时的波形

Fig. 12 Waveforms when the PWM duty cycle is 70%

## 5 结语

针对直接埋置于高压系统的无线测温装置供电困难问题,文中提出了一种由低压侧 LED 光源供电的新型温度在线监测系统,并设计了两级可 PWM 调光恒流驱动电路及高压侧无线测温装置。经实测,高压侧无线测温装置在  $3.3\text{ V}$  供电电压下平均消耗电流约  $7.24\text{ mA}$ ,两级可 PWM 调光恒流电路在  $220\text{ V}$  工频交流电压输入、7 个串联的 LED 灯珠负载及 PWM 满占空比条件下驱动性能良好,当 PWM 占空比为 70% 时,电路输出平均电流为  $413\text{ mA}$ ,该状态下既能使高压侧电路正常工作又能最大限度节约电能,为最佳工作状态。

虽然目前 LED 光供电方式的光电能量传递效率低于激光供电方式,但 LED 光源在使用寿命和制造成本方面相比激光光源拥有巨大的优势,且驱动电路结构简单、易于实现,随着硅系太阳能电池光电转换技术的进一步发展,该方式具有良好的发展前景。

## 参考文献:

- [1] 焦斌亮,付伟,赵德功. 高压输电线路 CT 取能电源的设计[J]. 电源技术,2013,37(1):130-133.

- JIAO Binliang, FU Wei, ZHAO Degong. Design for CT energy-getting power of high voltage transmission line[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(1): 130-133.
- [2] 黄新波, 石杰, 陈小雄, 等. 基于互感取能的导线监测传感器电源设计[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 16-22.
- HUANG Xinbo, SHI Jie, CHEN Xiaoxiong, et al. Design of mutual inductance-based power supply for conductor monitoring sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 16-22.
- [3] 熊兰, 何友忠, 宋道军, 等. 输变电线路在线监测设备供电电源的设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2252-2257.
- XIONG Lan, HE Youzhong, SONG Daojun, et al. Design on power supply for the transmission line on-line monitoring equipment[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2252-2257.
- [4] 季龙三, 侯铁信, 卜正良, 等. 电子式互感器工作电源及唤醒机制的实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 150-155.
- Ji Longsan, HOU Tiexin, BU Zhengliang, et al. Design of power supply for electronic transformer and implementation of its awakening mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 150-155.
- [5] 黄金鑫, 张黎, 李庆民, 等. 智能监测用电容式集能转换器拓扑性能研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 78-81.
- HUANG Jinxin, ZHANG Li, LI Qingmin, et al. Topologies of capacitive energy scavenging converter for smart monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 78-81.
- [6] 李玉凌, 李二霞, 周自强, 等. 可应用于中压开关柜温度在线监测的无线供电传感器研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 19-23.
- LI Yuling, LI Erxia, ZHOU Ziqiang, et al. Wireless powered sensor for temperature monitoring of MV switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 19-23.
- [7] 王俊峰, 张杭, 王道军. 一种应用于智能中压断路器无线供电的测温装置[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 56-61.
- WANG Junfeng, ZHANG Hang, WANG Daojun. Wireless temperature measuring device applied in intelligent medium voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 56-61.
- [8] SVELTO C, OTTOBONI R, FERRERO A M. Optically-supplied voltage transducer for distorted signals in high-voltage systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(3): 550-554.
- [9] 邱红辉, 段雄英, 邹积岩. 基于 LPCT 的激光供能电子式电流互感器[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 66-72.
- QIU Honghui, DUAN Xiongying, ZOU Jiyang. A laser powered electronic current transformer based on LPCT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 66-72.
- [10] 朱炜, 高学山, 吴晓兵, 等. 混合光电电流互感器的反馈式激光供能[J]. 微纳电子技术, 2007(z1): 146-149.
- ZHU Wei, GAO Xueshan, WU Xiaobing, et al. Power supply of hybrid optical-electronic current transformer on feedback mode[J]. Micronanoelectronic Technology, 2007(z1): 146-149.
- [11] 高迎霞. 电子式电流互感器高压侧电路及电源的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.
- GAO Yingxia. Study on high voltage circuits and power supply of electronic current transformer[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.
- [12] 宋涛. 地电位供电型电子式电流互感器的设计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(5): 80-84.
- SONG Tao. Design of electronic current transformer supplied by a ground potential power source[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2012, 49(5): 80-84.
- [13] 江和, 张培铭, 翁桂华. 基于无线通信的高压设备温度监测系统的设计[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1969-1975.
- JIANG He, ZHANG Peiming, WENG Guihua. Design of temperature monitoring system for high-voltage equipment based on wireless communication[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9): 1969-1975.
- [14] 李磊. LED 照明电源的研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- LI Lei. Research and design of LED lighting source[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [15] 谭晖. nRF24AP2 单片 ANT 超低功耗无线网络原理及高级应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- TAN Hui. Principle and advanced application of nRF24AP2 monolithic ultra-low-power wireless network[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.
- [16] 段雄英, 吕斌, 邱红辉, 等. 高压 ECT 中激光供能电源的设计[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 428-431.
- DUAN Xiongying, LYU Bin, QIU Honghui, et al. Design of optical power supply for high voltage ECT[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 428-431.
- [17] 王宁. 无线传感器网络激光主动供能关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- WANG Ning. Key technical research of laser active power supply for wireless sensor networks[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- 康荣波(1990—), 男, 硕士研究生, 现从事变电二次检修工作。
- 杨明发(1977—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电机电器及其系统智能化与在线监测技术。