

基于 STM32 大功率 LED 调光控制器设计

关丛荣¹, 赵伟程¹, 祝天岳², 王愉天¹, 刘政贤¹, 胡子佳¹

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 大功率 LED 在汽车前灯、夜间照明等领域有广泛应用, 它的高效节能调光对于工业商业乃至生活都有重要意义。本文基于 STM32 单片机, 采用 PWM 调光和蓝牙无线传输方式, 实现无线大功率 LED 调光控制。PWM 频率选择 2 kHz, 通过按键和蓝牙方式控制 LED 灯亮度, 控制信息显示在 LCD 显示屏上。

关键词: 大功率 LED; PWM 调光; STM32; 蓝牙

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-440X.2019.06.017

High-power LED Dimming Controller Based on STM32

GUAN Congrong¹, ZHAO Weicheng¹, ZHU Tianyue², WANG Yutian¹,
LIU Zhengxian¹, HU Zijia¹

(1. North China University of Technology, Beijing 100144 China;

2. Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation (CSSC), Beijing 100094 China)

Abstract: High-power LED lamp has a wide range of applications in the automotive headlights, night lighting and other fields. It is of great significance to industry and commerce and even to life for its high-efficiency energy-saving dimming. Based on STM32 microcontroller, in this paper, PWM dimming and Bluetooth wireless transmission are used to accomplish wireless high-power LED lamps dimming control. 2 kHz is selected for PWM frequency, LED brightness can be controlled through buttons and Bluetooth, and the control information is displayed on the LCD screen.

Key words: high-power LED; PWM dimming; STM32; Bluetooth

引言

LED 照明凭借着高效节能、绿色环保、体积小寿命长等特点受到各国的青睐^[1,2], 在节能减排中发挥了重要作用。LED 调光控制方法主要包括线性调光、可控硅调光和 PWM 调光三种方式^[3,4]。其中 PWM 调光技术优点在于控制灵活简单、高精度、高效率以及调光频率范围广和不会出现频闪等, 是目前较为常用的控制方法。本文基于 STM32 单片机进行大功率 LED 调光控制器设计, 给出硬件电路原理图及关键电路设计, 以及相应的软件设计, 并验证其是否满足设计需求。

1 PWM 调光原理

脉冲宽度调制 (PWM) 是一种周期一定而高低电平的占空比可以调制的方波信号, 通过调整 PWM 波形的周期和占空比可以调节大功率 LED 驱动器的输入电压, 进而实现对驱动器输出的驱动电流的控制^[5,6], PWM 工作原理图如图 1 所示。图中 CNT 为自动重装载计数器, ARR 为预装载寄存器, CCRx 为捕获/比较寄存器。假设定时器为向上计数 PWM 模式, t 时刻对计数器值和比较值进行比较, 如果计数器值小于 CCRx 值, 输出低电平; 如果计数器值大于 CCRx 值, 输出高电平。

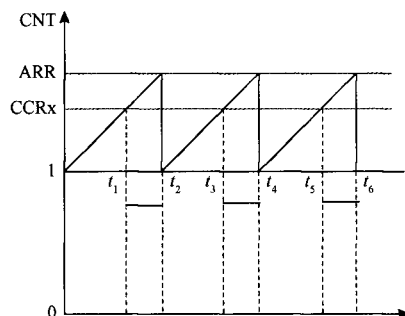


图1 PWM工作原理

Fig. 1 Working principle of PWM

PWM的一个周期是指定时器从0开始向上计数, 在 $0-t_1$ 段定时器计数器TIMx_CNT值小于CCRx值输出低电平; t_1-t_2 段定时器计数器TIMx_CNT值大于CCRx值输出高电平; 当TIMx_CNT值达到ARR时定时器溢出重新向上计数, 依次循环。改变CCRx的值就可以改变PWM输出的占空比, 而改变ARR的值就可以改变PWM的输出频率^[7,8]。

假设高电平灯点亮低电平熄灭, 则在PWM波一个周期内灯点亮的时间就等于周期×占空比。调整占空比, 就可以控制LED在一个周期内的点亮时间。本文控制器设计PWM频率选择2 kHz。

无线方式选用蓝牙方式, 本设计使用的蓝牙型号为ATK-HC05, 由6个间距为2.54 mm的排针与外部相连接, 其配置了蓝色LED灯用于配对状态输出的显示, 如果上电KEY端口置为高电平, 择LED闪烁为1秒亮1次; 如果KEY悬空则LED 1 s亮2次; 如果配对成功LED 2 s亮1次。

蓝牙上电配对后为全双工串口, 可以传输8位的数据为和1位的停止位, 并且是无奇偶校验进行通信。模块主从一体化, 可以通过AT指令集改变主从模式, 也可由程序设定按键改变主从模式, 这样使电路的使用更加灵活, 而且其传输距离可达到10 m之远。

2 控制器组成

大功率LED调光控制器主要由遥控端和控制端两部分组成, 各部分由STM32主控芯片、蓝牙模块、按键模块、TFTLCD屏幕显示模块组成, 控制端也可通过手机蓝牙来传输数据控制调光, 整个控制器如图2所示。

图2中, 遥控端和手机蓝牙串口助手作为两种独立方式可分别对控制端进行控制, 控制端可独立

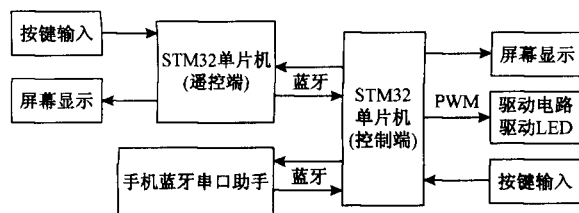


图2 控制器框图

Fig. 2 Controller block diagram

输出不同占空比的PWM波, 或分别接收遥控端和手机数据输出不同占空比的PWM波, 再通过大功率LED驱动电路实现LED调光, 所有的信息均可在遥控端和控制端的显示屏上显示。

LED驱动电路选择了恒流源作为LED驱动方式参照凌特公司官网LT3791芯片典型参考电路, 设计输入电压为15~60 V、最大输出电压为28 V, 输出电流为4 A的驱动电源。电路参数选取及设计可见文献[9]。

3 硬件电路设计

3.1 MCU模块

本文采用STM32F103RCT6单片机, 该模块包括开关电路、复位电路、晶振电路和CR1220纽扣电池供电电路等^[10,11]。开关电路操控整个电路的通断, 复位电路是使整个系统回到起始状态并重新进行计算, 晶振电路要为系统提供精准的时钟信号。MCU部分模块如图3所示。

系统上电VCC电压由0增加值3.3 V为 C_1 电容充电, R_3 端电位大小和持续时间将影响系统能否上电复位, 由于机器周期等于12倍震荡周期, 对于系统8 MHz晶振来说, 复位时间应大于式(1)所计算出的时间。

$$t = 2 \times \frac{1}{8} \times 12 = 3 (\mu s) \quad (1)$$

当RESET电压超过上电电压0.7倍即2.31 V时持续时间超过3 μs , 系统便会复位。电容两端暂态电流与电压关系见式(2)。

$$U_c(t) = U_c(\infty) + [U_c(0^+) - U_c(\infty)]e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

式中, $U_c(\infty)$ 为3.3 V, $U_c(0)$ 为0由此得到 $U_c(t)$ 见式(3)。

$$U_c(t) = 3.3 - 3.3e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

设RESET电压为 $U_R(t)$, 则

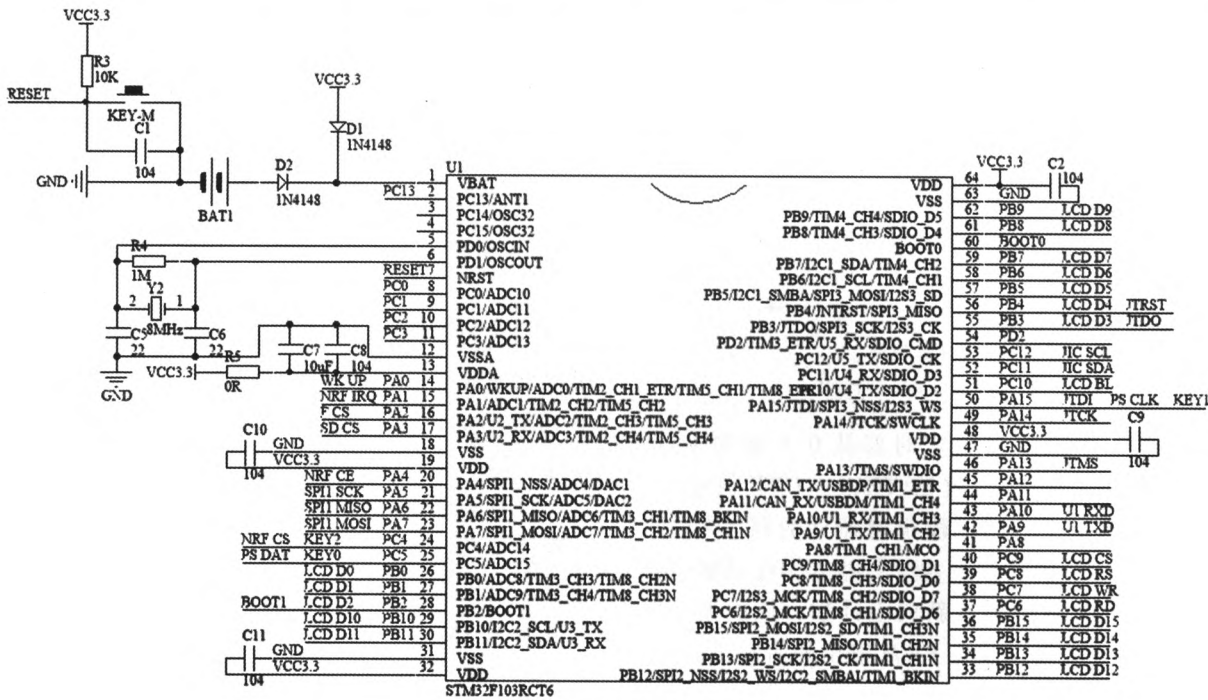


图 3 MCU 模块

Fig. 3 MCU modules

$$U_R(t) = V_{cc} - U_c(t) \quad (4)$$

所以 $U_R(t) = 3.3e^{-\frac{t}{RC}}$, 当 $U_R(t) = 2.31 \text{ V}$ 时, $t = 0.3567 RC$, 由式 (1) 知 $t \geq 3 \mu\text{s}$ 时, 复位条件才满足, 即 $R_C \geq 8.4 \times 10^{-6}$, 故选择 $R = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 0.1 \mu\text{F}$ 符合要求。

STM32F103RCT6 外接 8 MHz 晶体振荡器作为外部震荡方式, 晶振电路电容的选择是在许可的范围内数值越低越好, 一般晶振所配电容在 10 ~ 50 pF 之间, 本设计所选电容为 22 pF 以削减谐波对电路稳定性的影响。

3.2 蓝牙及显示屏接口模块

本设计通过普通 IO 口模拟 8080 总线来控制 TFTLCD 屏幕的显示, 所选屏幕为 2.8 寸分辨率为 320 × 240, 16 位真彩显示, 总计使用了 21 个 IO 口。屏幕 RST 信号线直接连在 STM32 的复位引脚, 可以直接通过单片机 RESET 键进行复位。TFTLCD 屏幕接口模块如图 4 所示。

本设计采用 ATK-HC05 蓝牙串口模块, 蓝牙接口模块接口设计与 HC05 模块相对应。ATK-HC05 是一款高性能主从一体的蓝牙串口模块, 它可以同

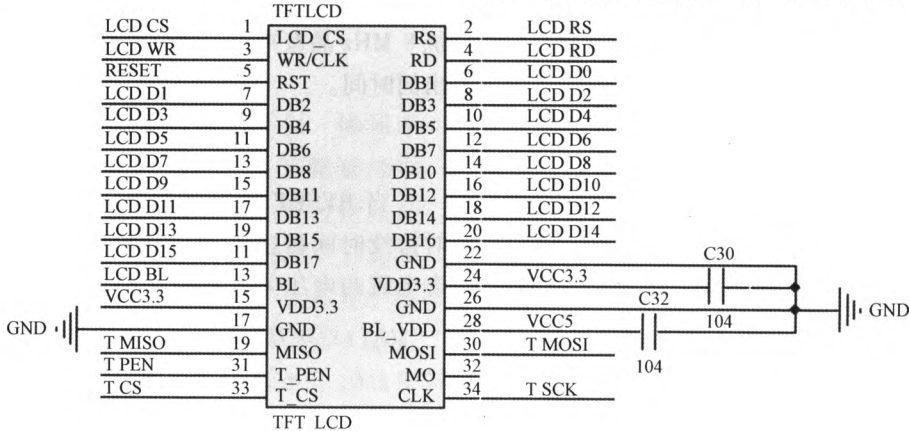


图 4 LCD 模块

Fig. 4 LCD modules

手机电脑等终端进行配对，也可互相配置主从进行连接。该模块波特率范围在 4 800 ~ 1 382 400，且兼容 3.3 V 或 5 V 的单片机系统，本设计采用 3.3 V 供电，蓝牙接收和发送端分别连接 STM32 芯片 PA2 和 PA3 管脚。蓝牙接口模块如图 5 所示。

3.3 电源模块

本设计采用前端电源适配器提供 5V 直流电源，主要提供给 TFTLCD 显示屏供电。通过 AMS1117 - 3.3 稳压芯片降压得到 3.3 V 电源电压给控制系统供电。其电源模块电路如图 6 所示。

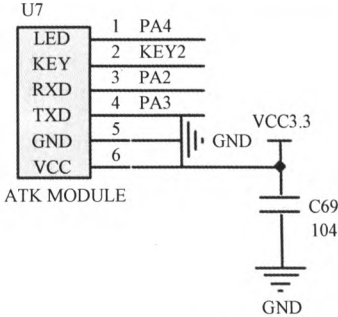


图 5 蓝牙模块
Fig. 5 Bluetooth modules

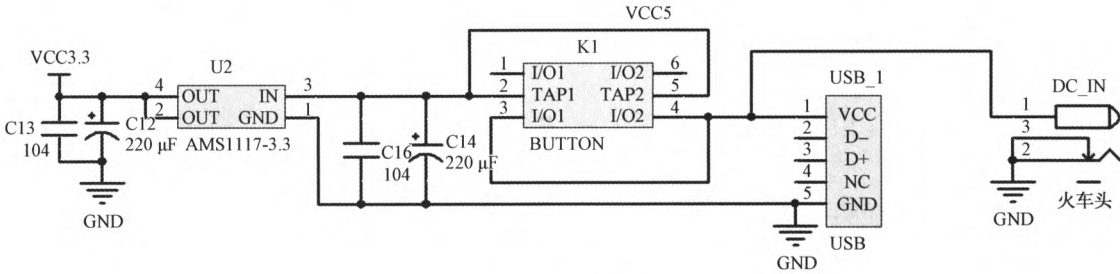


图 6 电源模块
Fig. 6 Power modules

4 软件设计

本设计编写程序采用 MDK 编程软件，所涉及计算机语言为 C 语言^[12]。程序总体思路先对整个系统设备、系统资源以及 GPIO 端口进行初始化。然后让程序进行无限循环，在循环中通过按键按下，使得程序进行下一步处理，且蓝牙状态、PWM 波占空比同显示屏显示数值同时进行相应改变。主程序流程图如图 7 所示。

在电路上电后先进行延时初始化，串口 1 初始化波特频率 9600，初始化与 LCD 屏幕、蓝牙连接的硬件端口、初始化按键、蓝牙与 LCD 屏幕并设置 TIM1 通道 1 开始以 2 kHz 频率输出占空比为 0 的 PWM 波，初始化程序如下：

```
Stm32_Clock_Init(9); //系统时钟设置
delay_init(72); //延时初始化
uart_init(72,9600); //串口 1 初始化为 9600
KEY_Init(); //初始化按键
LCD_Init(); //初始化 LCD
usmart_dev. init(72); //初始化 USMART
TIM1_PWM_Init(500-1,84-1); //PWM 频率
```

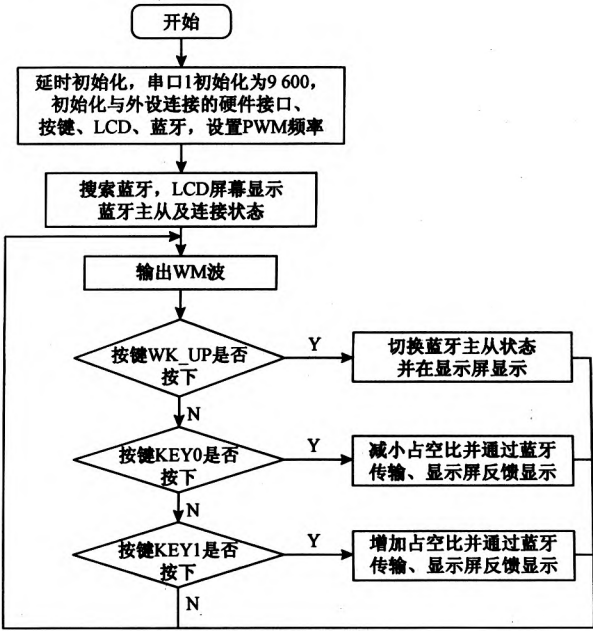


图 7 主程序流程图
Fig. 7 Main program flowchart

```
POINT_COLOR = RED;
LCD _ ShowString ( 30, 50, 200, 16,
16,"PWM:%");
while( HC05_Init()) //初始化蓝牙模块
```

主程序通过 While (1) 的死循环进行按键扫描, 当按键 WK_ UP 按下时, 通过程序内的 “AT + ROLE = 0” 或 “AT + ROLE = 1” 指令进行蓝牙的状态取反设置, 初始默认状态为 “SLAVE” (从机), 蓝牙切换程序:

```
if( key == WKUP_PRES
{
    key = HC05_Get_Role(); //切换主从模式
    if( key! = 0xFF)
    {
        key = ! key; //状态取反
        if( key == 0) HC05_Set_Cmd( " AT + ROLE = 0" );
        else HC05_Set_Cmd( " AT + ROLE = 1" );
        HC05_Role_Show();
        HC05_Set_Cmd( " AT + RESET" ); //复位
    }
}
```

当按键 KEY0 按下时, 调节占空比大小减小 10% 并向串口 2 发送数据 “000”, 蓝牙接收到数据向对位机发送, 使得对位机收到信号 PWM 波占空比减小, 同时两台单片机显示屏均显示改变后的 PWM 占空比数值。若占空比为 0% 则不执行操作, KEY0 按键操控程序:

```
else if( key == KEY0_PRES)
{
    delay_ms(10);
    u2_printf( "000" ); //发送“000”到蓝牙
    reflen = USART2_RX_STA & 0X7FFF;
    USART2_RX_BUF[reflen] = 0;
    if( led0pwmval > 0) led0pwmval = led0pwmval - 50;
    else led0pwmval = 0;
    USART2_RX_STA = 0;
}
```

当按键 KEY1 按下时, 调节占空比大小增加 10% 并向串口 2 发送数据 “001”, 蓝牙接收到数据向对位机发送, 使得对位机收到信号 PWM 波占空比增加, 同时两台单片机显示屏均显示改变后的 PWM 占空比数值。若占空比为 100% 则不执行操作, KEY1 按键操控程序:

```
else if( key == KEY1_PRES)
{
    delay_ms(10);
```

```
u2_printf( "001" );
reflen = USART2_RX_STA & 0X7FFF;
USART2_RX_BUF[reflen] = 0;
if( led0pwmval < 499) led0pwmval = led0pwmval
+ 50;
else led0pwmval = 500;
USART2_RX_STA = 0;
}
```

这样程序编写使得两个对位单片机操作十分灵活, 既可以作为遥控部分发出信号, 也可作为控制部分接收信号, 还可以两端同时操控同样照明亮度的 LED 设备。

5 实验

依前述软硬件设计完成了控制器实物图, 如图 8 所示。

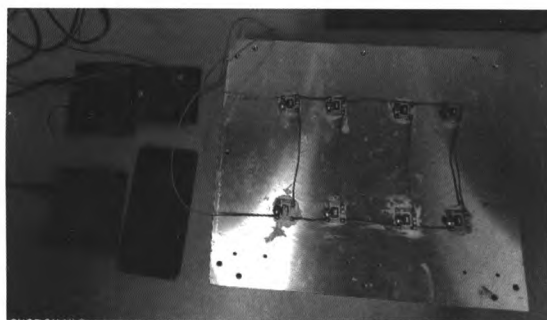


图 8 控制器实物图

Fig. 8 Physical diagram of controller

对控制器进行了不同占空比的调光实验, 由 PWM 输入引脚至驱动电源 5 V 稳压输出引脚, 使得 LED 灯能够保持亮度不变, 控制器与驱动电源连接电源上电, 为保证系统稳定, 设置直流稳压电源输出电压为 30 V, 通过改变遥控端输入信号改变 LED 灯亮度。选择 PWM 占空比为 0%、50% 和 100% 时的波形如图 9 所示。

结合示波器示数, 在 PWM 占空比分别为 0%、50% 和 100% 时, 整个系统显示效果如图 10 所示。

综合以上调试, 大功率 LED 调光控制器可以保证对输出电流电压的平稳控制, 完成对 LED 灯的无线稳定调光, 并且 PWM 与蓝牙等信息能够正确显示在显示屏上, 满足本课题的设计需求。

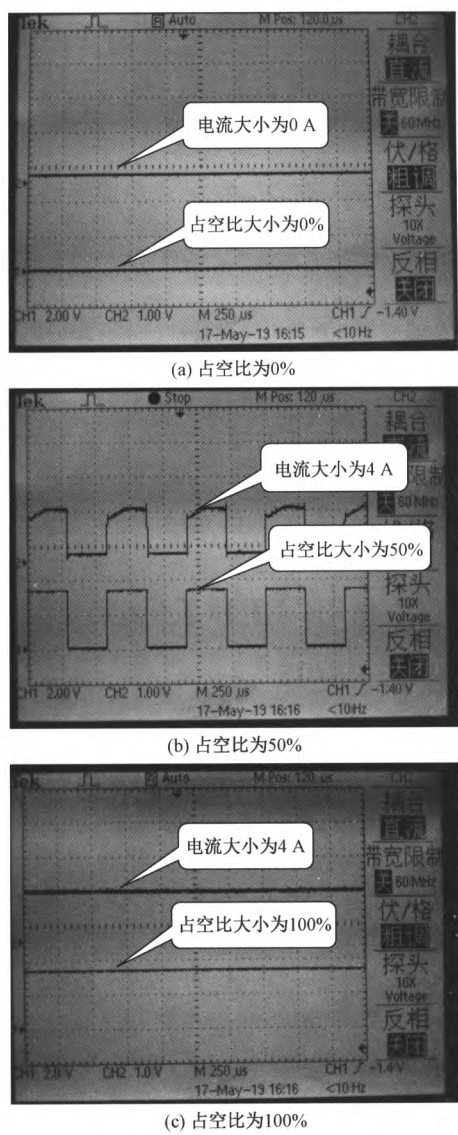


图 9 PWM 不同占空比测试结果

Fig. 9 Test results of PWM different duty cycle test results

6 结论

大功率 LED 在未来必将有着更好的发展前景，而 LED 调光控制器也必须不断完善和发展。本文基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器 STM32F103RCT6，以蓝牙无线通信方式远距离操控大功率 LED 灯的亮暗，控制方式更加灵活安全。

在调光控制器调试过程中，充分遵循先模块后整体的思路，验证按键模块、蓝牙模块、LCD 屏幕模块和 PWM 模块的可靠性，达到了设计初期对大功率 LCD 调光控制器的设计目标。

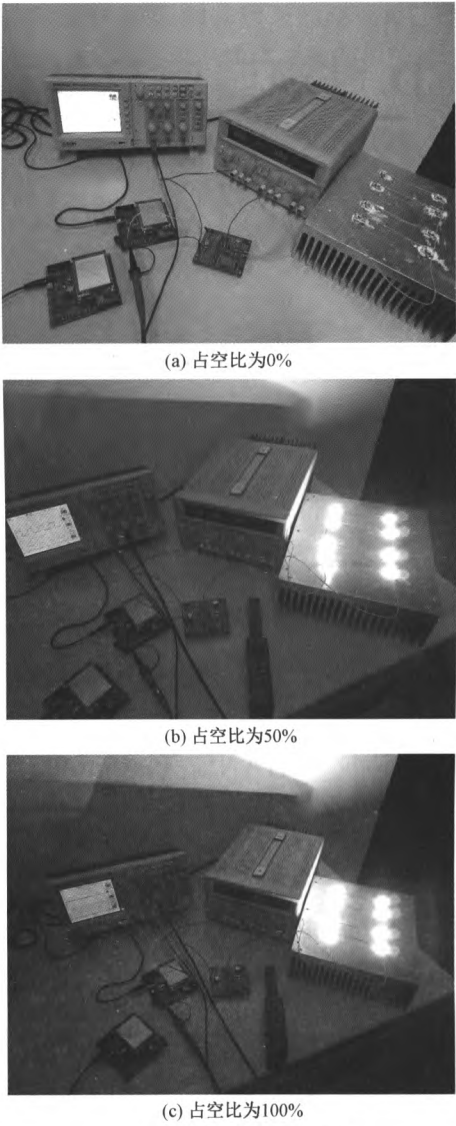


图 10 控制器控制效果图

Fig. 10 Controller control effect diagram

参考文献

[1] 梁人杰. 智能照明控制技术发展现状与未来展望[J]. 照明工程学报, 2014, 25 (2): 15.

[2] 陈镜羽, 葛爱明. 照度及色温自适应调节的 LED 台灯设计[J]. 照明工程学报, 2017, 28 (3): 70.

[3] 贾冬颖, 王巍. 基于 STC 单片机 LED 智能照明系统的设计[J]. 照明工程学报, 2010, 21 (2): 71

[4] 张春源. LED 调光技术及其应用[J]. 福建建材, 2019 (3): 104-106.

[5] 孔文. LED 调光设计思考: 可控硅 vs PWM[J]. 集成电路应用, 2010 (11): 24-27.

[6] 宁鹏飞. 基于 Buck-Boost 可调光 LED 驱动电源的研究和设计[D]. 上海: 复旦大学, 2013.

(下转第 104 页)

3.3.2 采用三相配电的方式

三相配电时，三相上的自然泄漏电流，平衡的部分可以互相抵消。如果配电系统分配的好，自然泄漏电流几乎可以忽略不计，RCD 检测到的就是故障漏电流， $I_{\Delta n}$ 即使整定小一些也无妨，多数情况可以取 30 mA。对于 LED 景观照明工程，三相配电不

仅可以减小正常运行时自然泄漏电流对配电系统的影响，还可以降低电压损失、减少配电回路数量，尤其适用大型建筑，如体育场、大型桥梁等工程。表 4 为我们在郑州博物馆工程中实测的三相配电回路正常运行时泄漏电流的部分数据。测量范围内的灯具均为 36 W/220 V 的线性洗墙灯。

表 4 三相配电回路泄漏电流的测量值
Table 4 Measurement value of leakage current of three-phase distribution circuit

回路编号	WL1	WL2	WL3	WL4	WL5	WL6	WL7	WL8	WL9
灯具数量	144	144	144	144	144	144	144	144	144
正常泄漏电流/mA	3.14	2.19	2.04	3.24	1.32	2.29	0.84	2.14	2.36

3.4 小结

在工程条件允许且保证供电系统合理的情况下，景观照明配电系统的 $I_{\Delta n}$ 宜优先选择 30 mA，不仅可以满足间接接触防护的要求，还可以作为直接接触防护的后备保护。

LED 景观照明工程，要重视 LED 灯具驱动电源正常泄漏电流对配电系统的影响。对距离较长、灯具或独立式驱动电源较多的配电回路，应通过计算来确定 $I_{\Delta n}$ 的取值，以保证配电系统的可靠性。当 $I_{\Delta n}$ 的取值较大时，要结合不同的接地系统即 TN 系统和 TT 系统，对 Z_s 和 R_A 做出相应的要求，以满足接地故障时自动切断电源的条件。

对体量大、供电回路多、供电距离长的工程，采用三相配电且 $I_{\Delta n}$ 取 30 mA，不失为一个较优的选择。

4 结束语

LED 照明技术的快速发展，推动了 LED 产品在景观照明工程中的大量运用。在相关标准未能完善之际，工程设计中不合理的 $I_{\Delta n}$ 取值影响了配电系

统的可靠性。本文从分析 $I_{\Delta n}$ 取值的原则入手，结合现行相关标准的规定和实际工程泄漏电流的测算结果，给出了计算确定 $I_{\Delta n}$ 合理值的方法。考虑到目前研究的样本数量有限，作者将进一步对不同天气条件、不同使用年限的 LED 景观照明配电线路的泄漏电流进行测量和分析，希望研究结论能为 LED 景观照明配电系统的设计和工程实施提供借鉴与指导，并为相关标准的完善提供参考。

参 考 文 献

[1] 低压配电设计规范：GB 50054—2011 [S]. 北京：中国计划出版社，2012.

[2] 剩余电流动作保护装置安装和运行：GB/T 13955—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[3] 剩余电流动作保护电器（RCD）的一般要求：GB/T 6829—2017 [S]. 北京：中国标准出版社，2017.

[4] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册（第四版）[M]. 北京：中国电力出版社，2016.

[5] 沙占友，王彦明，马洪涛，等. LED 驱动电源设计入门 [M]. 北京：中国电力出版社，2017.

[6] 欧阳永忠. 剩余电流测量在排查路灯漏电隐患中的应用 [J]. 照明工程学报，2019，30（3）：100-103.

（上接第 99 页）

[7] 徐连城. LED 照明产品发展方向的探讨 [J]. 照明工程学报，2011，22（增刊）：32.

[8] 王子权. 基于 STM32 的 PWM 调光器 [J]. 电气自动化，2018，40（6）：98-100.

[9] 关丛荣，祝天岳，李雅斌. 基于 LT3791 的大功率 LED 驱动电源的仿真设计[J]. 照明工程学报，2018,29(5):109.

[10] 刘海娟，彭保林，韩丽，等. 基于 STM32 的 PWM 汽

车内饰灯调光控制设计 [J]. 齐齐哈尔大学学报（自然科学版），2018，34（5）：19-23.

[11] Lu J, Wu X. A novel multiple modes PWM controller for LEDs [J]. 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2009, pp. 1767-1770.

[12] 程文龙，徐瑾，孙智勇. 基于 STM32 呼吸灯的实现 [J]. 电脑知识与技术，2018，14（7）：198-199.