

# 单级 PFC 恒流驱动及蓝牙调光技术的研究\*

邓 术 何志毅

(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

**摘要:** LED 智能照明系统逐渐应用到室内照明,具有智能控制、高效节能、绿色的特点。国内 LED 智能照明系统仍不完善,存在不易控制、能源浪费、功率因数低、谐波干扰大等问题,使得 LED 照明的优势没有很好的体现出来,并阻碍其推广。对智能调光控制技术进行研究,设计单级 PFC 反激式恒流驱动电路和蓝牙调光方案,Android 智能手机作为客户端以蓝牙无线技术传输调光控制信号,对 LED 恒流驱动电路进行开关、调光控制实现智能照明,具有便捷可靠、电源转换效率和功率因数高、电流总谐波低的性能。

**关键词:** LED 调光;无线传输;功率因数;谐波;室内照明

**中图分类号:** TN3      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.30

## Research on single-stage PFC constant current drive and bluetooth dimming technology

Deng Shu He Zhiyi

(Information & Communication College, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** LED intelligent lighting system was gradually applied to indoor lighting, have the characteristics of intelligent control, high efficiency and energy saving. Domestic LED intelligent lighting system has some problems, such as hard to control, energy waste, low power factor and harmonic interference, which make the advantage of LED lighting is not performance, also impact its promotion. In this paper, intelligent dimming control technology is analyzed. Single-stage PFC flyback type constant current drive circuit and Bluetooth, Wifi dimming solution were designed. The dimming driver circuit has high reliability, high power efficiency and power factor, as well as low harmonic wave distortion of the input current.

**Keywords:** LED dimming; wireless transmission; power factor; harmonic wave; indoor illumination

### 1 引言

日常照明在我们的生活中扮演着重要的角色,随着技术发展,智能照明<sup>[1]</sup>技术日趋成熟,正逐渐取代传统照明技术,成为一种趋势。LED 智能照明系统的关键因素是恒流驱动电路和调光控制系统<sup>[2]</sup>。LED 发光强度由其驱动电流决定,因此采用恒流驱动方式,反激式的单级 PFC 恒流驱动电源适用于室内照明。无线传输方式包括红外线、无线射频(ZigBee、蓝牙、Wifi、及其他 ISM 频段)遥控<sup>[4]</sup>。其中,红外遥控传输距离短、对方向性要求比较高<sup>[5]</sup>,在灯具上需要设计红外接收窗口可能影响外观,同时,驱动电源开关电路工作在几十 kHz,与红外遥控的脉冲副载波频率 38 kHz 相接近,会对红外接收头造成干扰<sup>[7-8]</sup>; ZigBee、蓝牙、Wi-F 工作在全球通用的 2.4 GHz

ISM 频段, ZigBee 传输范围小、数据传输速率低,其更偏向工业和工程应用;蓝牙技术采用快速确认和跳频方案,这一特点使蓝牙具有良好的抗干扰能力和系统稳定性;而且,蓝牙现在都有大量的终端(智能手机)支持,为智能照明控制提供了基础。设计并实现了单级 PFC 反激式恒流驱动电路<sup>[8]</sup>和蓝牙调光方案。设计的恒流驱动电路具有恒流特性良好、电源转换效率和功率因数高、电流总谐波低的特点,系统利用 2.4 GHz 蓝牙技术对多个 LED 光源进行开关和调光控制,实现高效、便捷、稳定的调光控制,实现了符合绿色照明理念的智能控制系统。

### 2 系统总体方案设计

该文设计并实现了单级 PFC 反激式恒流驱动电路和蓝牙调光方案。考虑到室内照明需要隔离输出且功率在

收稿日期:2015-03

\* 基金项目:国家自然科学基金(61077036)、桂林电子科技大学研究生科研创新(XY130212)项目

100 W 以下,采用反激式拓扑结构具有电路简单、效率高等特点,单级功率因数校正具有体积小、成本低等优点,源边控制技术不需要光耦及副边感应器件,电路工作在 DCM(断续电流模式)和恒定关断时间模式,具有较小的总谐波失真电流。以 Android 智能手机为客户端通过 2.4 GHz 蓝牙无线技术传输调光控制信号,对多个 LED 光源进行开关和调光控制。

### 2.1 单级 PFC 恒流开关电路

本文设计的单级 PFC 恒流开关电路电路结构如图 1 所示,交流市电经 EMI 滤波、整流滤波后进入高频变压器,输出端的电压电流信号通过源边反馈给 DC/DC<sup>[6-9]</sup> 和 PFC 控制器,控制器根据前端输入交流信号及后端电压电流信号控制开关管导通关断,从而控制整个电路的能量传递。

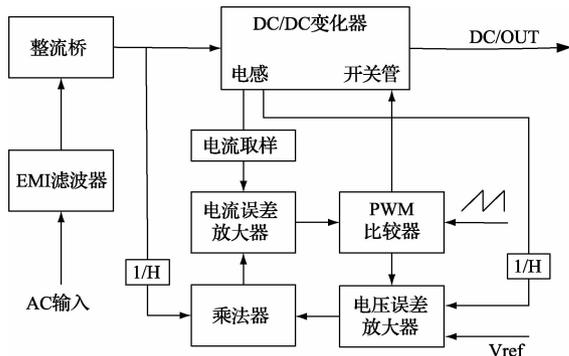


图 1 单级 PFC 恒流电路结构

单级 PFC 恒流电路工作原理如图 2 所示,最大的特点采用源边控制,与初级电感串联的  $R_6$  作为取样电阻检测初级电感输入电流,送入基准电压固定的比较器,与检测得到的呈正弦波变化的市电分压电压共同送入乘法器,相乘得到的结果作为动态基准电压与取样电阻  $R_6$  上的电压共同送入比较器,使得输入电流跟随输入电压呈正弦波变化,如图 3 和图 4 所示,电路经过功率因数校正以后达到高功率因数,并且可以精确地调制 LED 电流,同时,采用辅助绕组反馈电压来控制最大输出电压,而不需要光耦及副边感应器件,简化了电路结构。

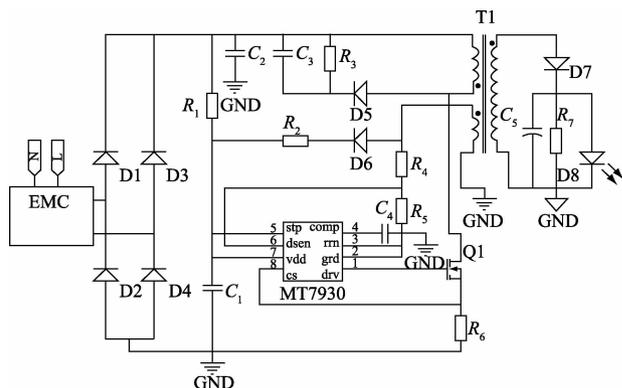


图 2 单级 PFC 恒流电路工作原理

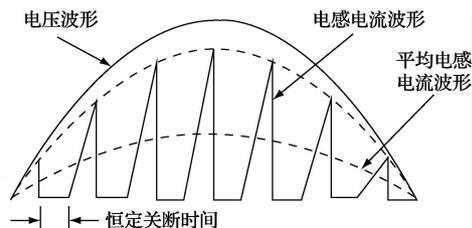


图 3 功率因数校正波形

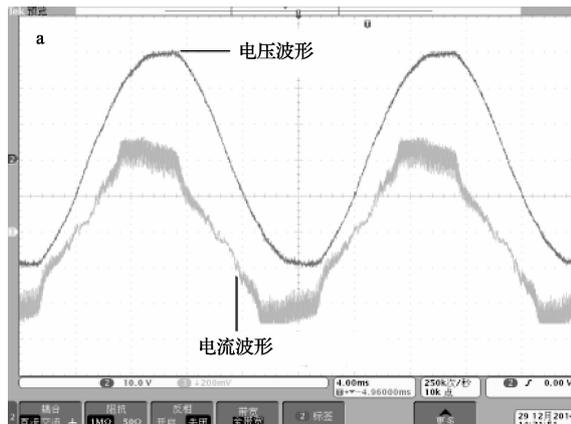


图 4 功率因数校正后的输入电压电流波形

### 2.2 高频变压器的设计以及重要参数的计算

变压器主要考虑磁芯及骨架的选取及绕制,磁芯选用 PQ2620,为了增加初级、辅助、次级绕组的有效耦合面积,减少变压器的漏感,磁芯的绕制采用三明治绕法,初级绕组夹在辅助绕组和次级绕组两边。

初级绕组匝数:

$$N_p = \frac{L_p I_{p-pk}}{Ae B_{max}} \times 10^6 \text{ (匝)}$$

式中:  $L_p$  的单位是 H,  $I_{p-pk}$  单位是 A,  $Ae$  单位是  $\text{mm}^2$ ,  $B_{max}$  是磁芯的最大磁通密度,单位是 T,通常取 (0.20T, 0.32T);

次级绕组匝数:

$$N_s = N_p \frac{V_o + V_f}{V_{OR}}$$

辅助绕组匝数:

$$N_a = N_s \frac{V_{dd} + 0.7 \text{ V}}{V_o + V_f}$$

计算采样电阻:

$$R_s = 0.94 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{V_{FB}}{I_{LED}}$$

式中:  $V_{FB} = 0.40 \text{ V}$ 。

关键外围元件的选择:

$$V_{out\_max} = 3.2 \left( \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) \frac{N_s}{N_a} - 0.7$$

计算出重要参数的值为:  $L_p = 246 \mu\text{H}$ ,  $N_p : N_a : N_s = 24 : 2 : 6$ ,  $R_s = 0.82 \Omega$ ,  $R_4 / R_5 = 4.33 \Omega$ 。

### 2.3 调光接口电路设计

为克服 MT7930 不支持调光的缺点,驱动电路需要增加调光接口,如图 5 所示,单片机输出的 PWM 脉冲调光信号可

通过 RC 积分电路后连接到低压 MOS 管的栅极,将此 MOS 管串联接入到原有的取样电阻上(图 2 中  $R_6$ )组成新的取样电阻,通过调节占空比来控制 MOS 的漏源电阻,改变整个取样电阻值,从而改变输出电流和输出功率。

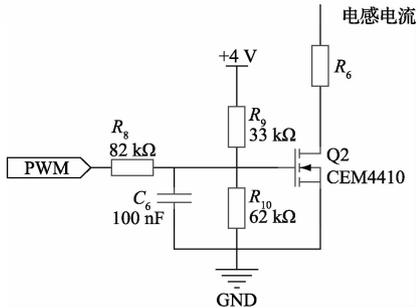


图 5 调光接口电路

### 2.4 蓝牙调光方案设计

蓝牙调光系统如图 6 所示,手机作为客户端,通过蓝牙与连接了蓝牙模块(HC-06)的单片机控制板通信,从 I/O 口输出多路占空比可调的 PWM 波,接到 LED 恒流电路的 DIM(调光)端口进行调光。

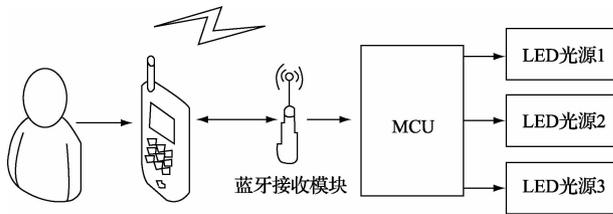


图 6 蓝牙调光系统

Android<sup>[10]</sup>手机与蓝牙设备之间点对点通信具体实现过程如图 7 所示,在手机客户端打开调光软件,进行蓝牙搜索,发送连接请求,建立 RFCOMM 信道模拟串口传输,

开启点对点或多点的无线功能,即可在手机上进行调光操作。

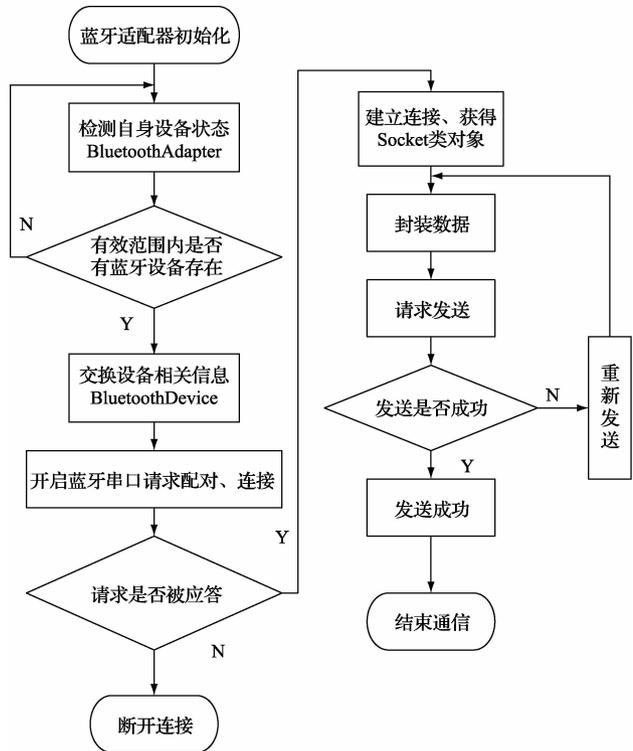


图 7 蓝牙点对点通信设计的流程

驱动电路中信号接收电路为 CH-06 蓝牙模块,处理电路为单片机控制系统,STC89C52RC 单片机最小系统如图 8 所示,CH-06 蓝牙模块的 TXD 端口(发送数据端口)和 RXD 端口(接收数据端口)分别与单片机 10 管脚 P3.0(RXD)和 11 管脚 P3.1(TXD)连接,实现蓝牙串口通信连接。

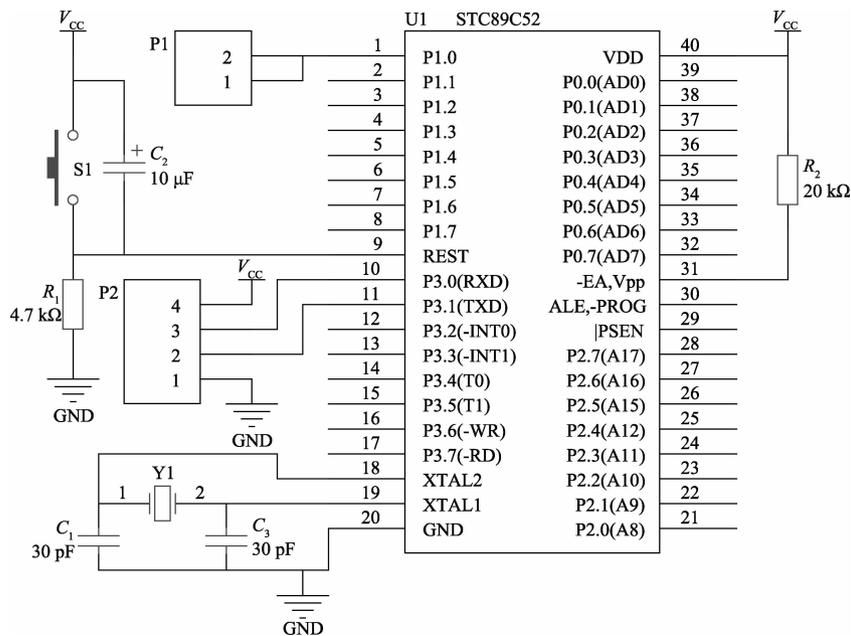


图 8 STC89C52RC 单片机最小系统

蓝牙信号被蓝牙接收模块接收并解调送入微处理器的串行口缓冲区 SBUF,软件处理流程 0X 如图 9 所示,该寄存器只有一个字节的长度,每次从单片机串行口接收一个字节数据供程序读取,处理器读取到调光信号的一个字节并进行同步头验证(验证码为 0XA5),若与设置的验证码不相符,不做任何处理,继续接收;若与设置的验证码相符,则定义为调光信号的头文件并计数器开始计数,接收完第四位后进行同步中验证(验证码为 0XF1),若与设置的验证码相符,则继续接收,接受完 7 个数据后进行尾同步验证,确定准确无误后提取第五位数据的码值,根据码值改变由单片机输出的 PWM 波的占空比,从而改变输出电流,对 LED 光源进行调光。其中,一个字节最大值是 255,所以理论上可以实现 0~255 亮度级。

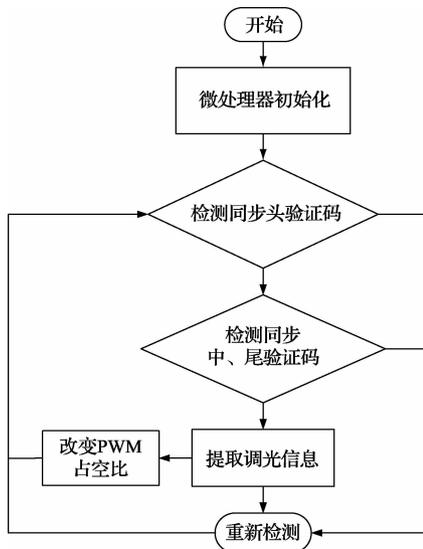


图 9 蓝牙调光接收端软件处理流程

### 3 实验结果与数据分析

调光过程中 LED 光源工作稳定无闪烁现象,并且具有较高的电源转换效率、功率因数和较低的谐波失真,如表 1 所示,测得的数据包括:输入功率( $P_i$ )、输出电流( $I_o$ )、输出电压( $V_o$ )、输出功率( $P_o$ )、电源转换效率( $\eta$ )、功率因数( $PF$ )、电流总谐波失真( $THD$ )。该驱动电源的调光范围从 0.33~40.1 W,最小功率小于额定功率的 1%。输出功率为额定功率(40 W)时,效率为 88.4%,功率因数为 0.976,电流总谐波失真为 8%;输出功率为额定功率的 40% 及其以上时,电源转换效率( $> 85\%$ )和功率因数( $\geq 0.897$ )保持在较高的水平,电流总谐波失真 $\leq 16.3\%$ 。

表 1 驱动电源调光数据

$P_i/W$	$I_o/A$	$P_o/W$	$\eta(\%)$	$PF$	$THD(\%)$
45.4	0.89	40.10	88.4	0.976	8.0
42.3	0.84	37.00	87.6	0.970	10.1
37.8	0.76	33.10	87.7	0.968	10.9
32.8	0.67	28.70	87.6	0.963	11.0
28.2	0.59	24.70	87.5	0.952	11.2
23.8	0.49	20.30	85.3	0.934	13.5
19.0	0.40	16.20	85.2	0.899	16.3
14.5	0.30	11.90	82.1	0.852	24.7
9.4	0.19	7.30	77.2	0.768	36.5
4.7	0.08	2.90	62.0	0.656	45.1
1.7	0.01	0.33	20.0	0.600	50.4

### 4 结论

设计了基于 MT7930 的 40WLED 单级 PFC 反激式恒流驱动电路和蓝牙调光方案。其核心工作是研究单级 PFC 控制电路以及蓝牙传输技术和调光信号处理。单级 PFC 控制把 PFC 和 DC/DC 两级集成在一起,通过一个功率管对整个电路进行控制,实现高 PF、恒压/恒流输出。与两级 PFC 相比具有体积小、成本低的优点,PF 值比无源校正网络高。Android 智能手机蓝牙调光带给人们更快捷舒适的操作,具有稳定性高、抗干扰和穿透能力强的特点。Android 手机客户端通过蓝牙无线技术传输调光控制信号,对 40 W LED 恒流驱动电路进行 PWM 调光控制,可实现 0~100% 额定功率的宽范围平滑调光,在调光过程中 LED 光源工作稳定无闪烁现象,并且具有很高的电源转换效率、功率因数和较低的谐波失真,提高了电网转换效率,避免对电网造成严重的干扰。此外,该蓝牙调光方案可以对多组 LED 光源进行亮度调节,实现远距离无线智能照明系统,将为智能照明市场提供一款新的绿色产品。

### 参考文献

- [1] 夏立方, 蔡娇, 赵升, 等. 基于 ZigBee 技术的智能无线调光系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 109-114.
- [2] 黄剑平, 沈汉鑫. 一种线性大功率 LED 驱动电路设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 37-40, 49.
- [3] GAURAV P, ANMOL R S, PRAVEEN B. Review of dimming techniques for solid-state LED lights[J]. International Journal of Advanced Engineering Research and Technology (IJAERT), 2014, 2(4): 2348-8190.

(下转第 79 页)

参考文献

- [1] 张大伟,陈佳品,冯洁,等.面向准危重病病人的区域性无线监护系统研制[J].仪器仪表学报,2014,35(1):74-81.
- [2] 夏立方,蔡娇,赵升,等.基于 ZigBee 技术的智能无线调光系统设计[J].电子测量技术,2013,36(10):109-114.
- [3] 裴永召,朱蕴璞.基于 ZigBee 的智能扬声器系统设计[J].国外电子测量技术,2014,33(2):45-48.
- [4] 焦尚彬,宋丹,张青,等.基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿检测系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(5):436-442.
- [5] 汪燕. ZigBee 组网的温度数据采集器的设计[J].计算机与现代化,2012(8):101-104.
- [6] 陈章进,姚真平,张建峰.基于 ZigBee 技术的城市智能公交系统设计[J].电子测量技术,2014,37(4):38-42.
- [7] 王春香,纪松波.采用 ZigBee 技术的温室环境监控系统

- 设计[J].电子测量技术,2014,37(12):120-122.
- [8] 奇华,李铮,刘军.基于 ZigBee 的污水监测系统节点软件设计[J].国外电子测量技术,2014,33(12):26-27.
- [9] 汪玉凤,尹靖康,刘翹楚,等.新型煤矿安全检测系统的设计[J].计算机测量与控制,2013,21(4):939-941.
- [10] 曲丽蓉,胡荣,范寿康. LabVIEW、MATLAB 及其混合编程技术[M].北京:机械工业出版社,2011.

作者简介

周海鸿,1962 年出生,1984 年 7 月毕业于。参与设计过广播系统、楼宇智能对讲系统、数字电视分支分配器等,并发表过多篇论文。

周嘉泰(通讯作者),1991 年出生,在读研究生。主要研究方向为集成电路测试理论。

E-mail:309162822@qq.com

(上接第 54 页)

- [4] 何璇. LED 室内照明关键技术的研究[D]. 广州:暨南大学,2013.
- [5] 刘娜. 红外通讯技术与蓝牙区别解析[J]. 信息系统工程,2012(1):26.
- [6] 何惠森. 基于 AC-DC 开关电源系统的电磁兼容设计及稳定性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [7] 赵慧荣. LED 驱动电路的电磁噪声研究及其改进[D]. 西安:陕西科技大学,2012.
- [8] 胡力元,闫斌,刘廷章. 大功率 LED 灯具的单级 PFC 恒流驱动及模拟调光技术的研究[J]. 电力电子技术,2014(13):93-97.

- [9] 刘秉安. 照相手机的 LED 闪光灯驱动电路设计的改进[J]. 电子测量技术,2013,36(4):24-27.
- [10] 耿富平,谈恩民. 基于 S3C6410 的 Android 系统移植[J]. 国外电子测量技术,2014,33(4):76-80.

作者简介

邓术,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为智能调光系统与控制信号传输和开关电源技术。

E-mail:15578398562@163.com

何志毅(通讯作者),1965 年出生,教授,博士。主要研究方向为 LED 无线光通信、光电显示与图像技术研究。

E-mail:hezhiyi@guet.edu.cn

(上接第 74 页)

- [8] 安宪军,黄尔烈,贾少锐,等. 基于 Delphi7.0 的上位机与 PLC 的通信[J]. 现场总线技术应用,2007,23(3):47-48.
- [9] 廖常初. S7-200 SMART 与 S7-200 的比较[J]. 电工技术,2013(11):52-53.
- [10] 刘明,郑敏. 基于 ModBus RTU 通讯协议在西门子 PLC S7-200 的应用[J]. 科技传播,2014(13):224-225.
- [11] 蔡森. ModbusRTU 协议中字节型 CRC-16 算法分

析与实现[J]. 物联网技术,2015(3):35-36.

作者简介

单星,1989 年出生,硕士研究生。主要研究方向为数据通信与计算机网络。

E-mail:1053363656@qq.com