

# 基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源设计

陶权保<sup>1,2</sup>, 阎铁生<sup>1,2</sup>, 胡啸天<sup>3</sup>, 李明洪<sup>1,2</sup>, 李佳龙<sup>1,2</sup>, 夏浩刚<sup>1,2</sup>

(1. 西华大学 电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 西华大学 四川省电力电子节能技术与装备高校重点实验室, 四川 成都 610039;

3. 四川大学 数学学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**针对传统仅使用功率因数校正(PFC)变换器设计的AC-DC LED驱动电源存在由2倍工频输出电流纹波造成的频闪问题,提出了一种基于Cuk PFC变换器的无频闪LED驱动电源。通过简单的电压模控制,所提变换器可以同时实现功率因数校正和低2倍工频输出电流纹波,实现高功率因数和LED无频闪。最后,通过一台11.2 W的实验样机验证了理论分析的正确性。

**关键词:**发光二极管驱动电源;Cuk变换器;功率因数校正;无频闪

**中图分类号:** TM46

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19633

## Design of a LED Driving Power Based on Cuk PFC Converter

TAO Quanbao<sup>1,2</sup>, YAN Tiesheng<sup>1,2</sup>, HU Xiaotian<sup>3</sup>, LI Minghong<sup>1,2</sup>, LI Jialong<sup>1,2</sup>, XIA Haogang<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039,

Sichuan, China; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving

Technologies & Equipment, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China;

3. College of Mathematics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of flicker caused by double-line frequency output current ripple in the AC-DC LED driving circuit designed by traditional power factor correction (PFC) converter, a flicker-free LED driving circuit based on Cuk PFC converter was proposed. Through a simple voltage mode control, the proposed converter could simultaneously realize power factor correction and low double-order line frequency current ripple, and achieved high power factor and flicker-free LED driving circuit. Finally, a 11.2 W experimental prototype was presented to verify the correctness of the theoretical analysis of the proposed converter.

**Key words:** lighting emitting diode(LED) driver circuit; Cuk converter; power factor correction(PFC); flicker-free

发光二极管(LED)相比于传统照明,具有体积小、寿命长、高效率、低损耗等显著优点而得到广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。传统的LED驱动电源虽然可以实现精确调节流过LED的电流,但是不能实现功率因数校正功能,无法满足IEC 61000-3-2 D类法规的谐波要求,因此在调节AC-DC LED驱动电源输出电流的同时,需要进行功率因数校正(PFC)<sup>[3-4]</sup>。

对于AC-DC LED驱动电源,带有PFC功能

的恒流输出驱动电源有单级变换和两级变换的2种方案。单级变换的LED驱动电源有反激、Buck及SEPIC等变换器,均可以同时实现PFC和恒定的电流输出。带PFC功能的单级AC-DC变换器输入到输出只经过1次功率变换,转换效率高<sup>[5-7]</sup>,但是单级PFC变换器输入和输出之间的功率不平衡,会导致其输出电流具有较大的2倍工频纹波,从而导致明显的LED频闪<sup>[8]</sup>。经医学研究表明,人们长期工作在明显频闪的光源下,人

**基金项目:**四川省科技厅应用基础项目(2016JY0161);四川省教育厅自然科学重点项目(17ZA0361);

成都市科技局惠民项目(2016-HM01-00503-SF)

**作者简介:**陶权保(1991—),男,硕士研究生,Email:943353558@qq.com

眼的视觉系统需要不断的调节,大大加重了人眼的负担,容易产生眼疲劳现象<sup>[9]</sup>。为了消除单级变换的输出电流2倍工频纹波,两级功率变换方案得到广泛的应用,前级提高功率因数,后级的DC-DC变换器用来消除前级输出端产生的2倍工频纹波,解决了频闪问题<sup>[10-11]</sup>。但是两级结构电路设计较为复杂,成本高而且效率较低。

本文提出了一种基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源。它属于单级PFC变换器,其前级回路与Boost变换器类似,输入电感工作在断续模式时可自动实现PFC功能,而Cuk变换器的后级输出回路类似于Buck变换器,可实现DC-DC变换,输出电流无脉动,纹波小。分析了驱动电源的工作原理和推导了功率因数值的表达式,最后设计了实验样机,验证了理论分析的正确性。

### 1 工作原理分析

图1为驱动电源的主电路,由输入滤波电感 $L_f$ 、二极管整流桥 $D_1$ 、输入滤波电容 $C_f$ 、二极管 $D_2$ 和 $D_3$ 、电感 $L_1$ 和 $L_2$ 、开关管 $Q_1$ 、中间储能电容 $C_1$ 和输出电容 $C_2$ 构成,前级回路类似于Boost变换器,用来实现PFC功能,后级回路类似于Buck变换器,实现DC-DC转换。前级的Boost PFC变换器的电感 $L_1$ 串联一个二极管 $D_2$ ,以解除电感 $L_1$ 和 $L_2$ 之间的耦合关系,使得2个电感有独立的工作模式且电感 $L_1$ 的电流不会为负<sup>[12]</sup>,能够充分发挥Cuk变换器的优势,使得其应用变得更加广泛。由文献<sup>[13]</sup>可知,不需要额外的控制回路,Boost变换器的电感工作在断续导电模式(discontinuous conduction mode, DCM)下,即可自动实现功率因数校正,故输入电感 $L_1$ 工作在DCM模式;电感工作在DCM模式下的Buck变换器控制回路简单,易于设计<sup>[14]</sup>,因此输出电感 $L_2$ 工作在DCM模式。

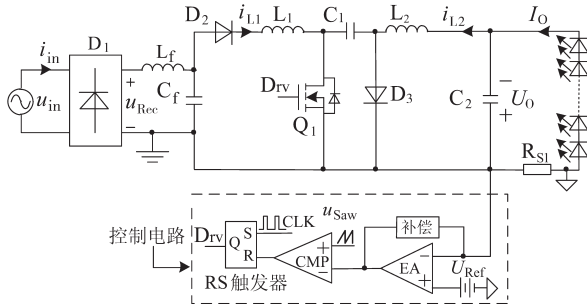


图1 驱动电源的主电路和控制电路

Fig.1 The main and control circuit of the driving power

所提LED驱动电源的控制回路为电压型控制,它由RS触发器、比较器CMP、电流采样电阻

$R_{S1}$ 、误差放大器EA等元器件构成。电流采样电阻 $R_{S1}$ 与负载LED串联,因此可以通过控制 $R_{S1}$ 两端的电压来调节流过LED的电流。

为了简化分析,做出如下假设:

1) 所有的元器件均为理想元件。

2) 开关频率 $f_s$ 远大于电网频率 $f_L$ 。开关周期 $T_s=1/f_s$ ;  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ 分别代表1个 $T_s$ 内开关管的导通时间和关断时间。

本文所提基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源在1个开关周期 $T_s$ 内有4个工作模式,不同工作模式的等效电路如图2所示。

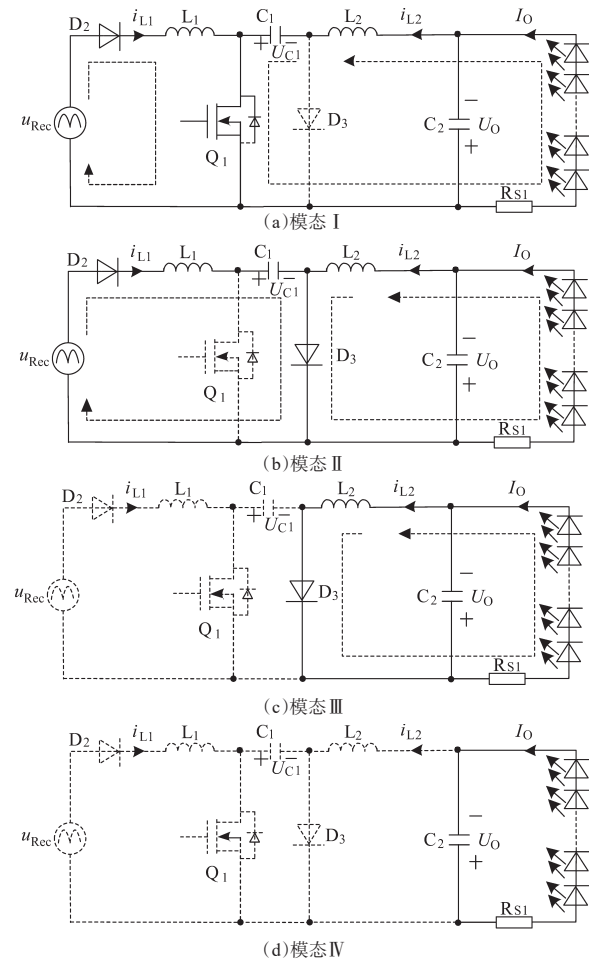


图2 基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源的工作模式

Fig.2 The operational mode of LED driving power based on Cuk PFC converter

1) 模式 I :如图 2a 所示,开关管 $Q_1$ 导通,二极管 $D_3$ 承受反向电压关断。交流输入电源通过二极管 $D_2$ 和功率开关管 $Q_1$ 给电感 $L_1$ 充电,中间储能电容 $C_1$ 经过开关管 $Q_1$ 给电感 $L_2$ 、输出电容 $C_2$ 和负载LED供电,电感电流 $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ 线性上升,上升斜率分别为

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{u_{Rec}(t)}{L_1} \quad (1)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{U_{C1} - U_o}{L_2} \quad (2)$$

式中: $u_{Rec}(t)$ 为整流后的电网输入电压; $U_{C1}$ 为电容 $C_1$ 两端的电压; $U_o$ 为负载LED串的正向导通电压。

2)模态 II:如图2b所示,开关管 $Q_1$ 关断,二极管 $D_2$ 维持导通,二极管 $D_3$ 承受正向电压开始导通,变换器工作在模态 II,交流输入电源和电感 $L_1$ 通过二极管 $D_2$ 和 $D_3$ 向中间储能电容 $C_1$ 充电,电感 $L_2$ 通过二极管 $D_3$ 向负载LED放电,电感电流 $i_{L1}, i_{L2}$ 线性下降,下降斜率分别为

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{U_{C1} - u_{Rec}(t)}{L_1} \quad (3)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{U_o}{L_2} \quad (4)$$

本文以电感电流 $i_{L1}$ 先于 $i_{L2}$ 下降至零为例进行分析,因此当电感 $L_1$ 的电流 $i_{L1}$ 下降至零,电感 $L_1$ 进入DCM模式,而电感 $L_2$ 能量还未完全释放,变换器进入模态 III。

3)模态 III:如图2c所示,当电感 $L_1$ 的电流 $i_{L1}$ 下降至零后,二极管 $D_2$ 关断,二极管 $D_3$ 仍然维持导通,变换器工作在模态 III,流过电感 $L_1$ 的电流为零,电感 $L_2$ 继续向负载LED放电,电感 $L_2$ 电流的下降斜率与式(4)相同。当电感 $L_2$ 的电流 $i_{L2}$ 下降至零,电感 $L_2$ 进入DCM模式,变换器进入模态 IV。

4)模态 IV:如图2d所示,变换器工作在模态 IV时,开关管 $Q_1$ 、二极管 $D_2$ 和 $D_3$ 均断开,电感 $L_1$ 和 $L_2$ 的电流 $i_{L1}$ 和 $i_{L2}$ 均为零,输出电容 $C_2$ 给负载LED提供能量。

## 2 变换器功率因数分析

令 $U_M$ 为输入交流电压的峰值,可得整流后的输入电压为

$$u_{Rec}(t) = U_M |\sin(\omega t)| \quad (5)$$

式中: $\omega$ 为工频的角频率。

图3为基于Cuk PFC变换器的无频闪LED驱动电源的主要波形。

如图3所示,基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源工作在DCM-DCM模式下,电感 $L_1$ 的峰值电流 $i_{L1-pk}$ 为

$$i_{L1-pk}(t) = \frac{U_M |\sin(\omega t)|}{L_1} T_{on} \quad (6)$$

式中: $T_{on}$ 为开关管的导通时间。

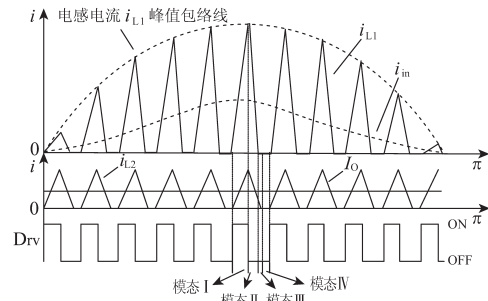


图3 基于Cuk PFC变换器的无频闪LED驱动电源的主要波形

Fig.3 Main waveforms of LED driving power based on Cuk PFC converter

当电路工作在DCM-DCM时,稳态的开关管导通时间恒定,由伏秒平衡原理可得到:

$$u_{Rec} T_{on} = (U_{C1} - u_{Rec}) T_{off} \quad (7)$$

式中: $T_{off}$ 为电感 $L_1$ 的电流 $i_{L1}$ 从峰值下降到0的时间。

在1个开关周期内,输入电感 $L_1$ 的平均电流可表示为

$$\begin{aligned} i_{L1}(t) &= \frac{i_{L1-pk} (T_{on} + T_{off})}{2T_s} \\ &= \frac{U_M T_{on}^2 |\sin(\omega t)|}{2T_s L_1 [1 - \frac{U_M}{U_{C1}} |\sin(\omega t)|]} \end{aligned} \quad (8)$$

在稳态工作时,由于在1个开关周期内电感 $L_1$ 的电流平均值为整流后的输入电流,因此,基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源的输入电流 $i_{in}$ 可表示为

$$i_{in} = \frac{U_M T_{on}^2 |\sin(\omega t)|}{2T_s L_1 [1 - \frac{U_M}{U_{C1}} |\sin(\omega t)|]} \quad (9)$$

可求出Cuk PFC LED驱动电源在半个工频周期内的输入功率 $P_{in}$ 及功率因数 $\cos\phi$ 的表达式分别为

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{2}{\pi} \int_0^\pi i_{in}(t) U_M |\sin(\omega t)| d(\omega t) \\ &= \frac{U_M^2 U_{on}^2}{2\pi T_s L_1} \int_0^\pi \frac{\sin^2(\omega t)}{1 - \frac{U_M}{U_{C1}} |\sin(\omega t)|} d(\omega t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \cos\phi &= \frac{\sqrt{2} P_{in}}{U_M I_{in-RMS}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin^2(\omega t)}{1 - \frac{U_M}{U_{C1}} |\sin(\omega t)|} d(\omega t)}}{\sqrt{\int_0^\pi \frac{\sin^2(\omega t)}{[1 - \frac{U_M}{U_{C1}} |\sin(\omega t)|]^2} d(\omega t)}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $I_{in,RMS}$ 为输入电流的有效值。

根据式(11)可以画出 $\cos\phi$ 值和 $U_M/U_{C1}$ 的函数关系图,如图4所示。可以看出,当 $U_M/U_{C1}$ 的值逐渐增大时, $\cos\phi$ 的值呈下降趋势。当 $U_M/U_{C1}<0.9$ 时, $\cos\phi$ 的值大于0.9。

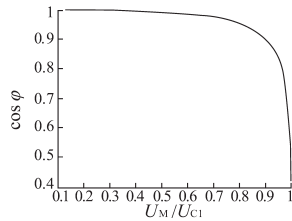


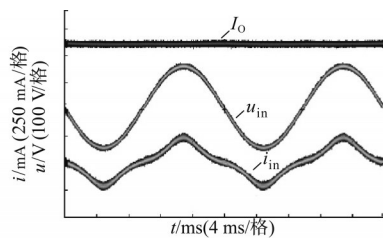
图4  $\cos\phi$  值与  $U_M/U_{C1}$  的关系

Fig.4 The relationship of  $\cos\phi$  and  $U_M/U_{C1}$

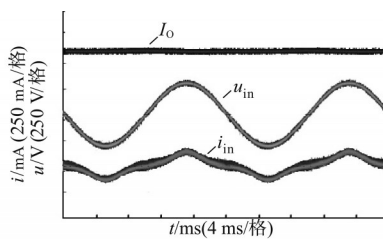
### 3 实验结果

为了验证所提电路及其控制策略理论分析的正确性,对提出的LED驱动电源搭建了实验样机进行了实验验证。电路的主要参数为:输入交流电压有效值  $U_{in,rms}=100\sim 240\text{ V}$ , 电网频率  $f_L=50\text{ Hz}$ , LED正向电压  $U_o=32\text{ V}$ , 额定LED电流  $I_o=350\text{ mA}$ , 电感  $L_1=0.2\text{ mH}, L_2=0.3\text{ mH}$ , 中间储能电容  $C_1=47\text{ }\mu\text{F}$ , 输出电容  $C_2=470\text{ }\mu\text{F}$ 。输出采用恒流控制,负载采用10颗高亮度白光LED串联。

图5a和图5b分别为AC 110 V和AC 220 V电压输入时,驱动电源的输入电压  $u_{in}$ 、输入电流  $i_{in}$ 、输出电流  $I_o$ 的实验波形。可以看出,在输入电压有效值为110 V和220 V时,输入电流接近正弦波形,且与输入电压同相位,实现了功率因数校正功能。从输出电流  $I_o$ 波形可看出,输出电流



(a)AC 110 V



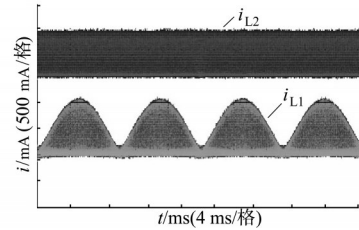
(b)220 V

图5 实验波形

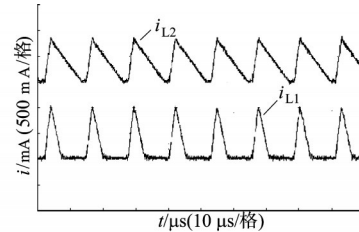
Fig.5 Experimental waveforms

$I_o$ 上无2倍工频纹波叠加,有效的减小了输出电流的2倍工频纹波,可以实现了LED无频闪。

图6a为110 V交流电压输入时,基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源在2个工频周期内的电感电流  $i_{L1}, i_{L2}$ 的实验波形。图6b为图6a在交流输入电压峰值点的电感电流  $i_{L1}, i_{L2}$ 的放大波形。由图6b可知,在每一个开关周期,电感电流  $i_{L1}$ 比  $i_{L2}$ 先降到0,且电感  $L_1$ 和  $L_2$ 均工作在断续模式,与图3的分析一致。



(a)2个工频周期



(b)电感电流  $i_{L1}, i_{L2}$  的局部放大波形图

图6 电感电流的实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of inductor current

图7为输入电压变化时,基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源的效率  $\eta$ 和  $\cos\phi$ 的实验测试结果,由图7可知,在整个输入电压范围内变换器的功率因数均大于0.95,变换器的效率最高值达到了87.2%。

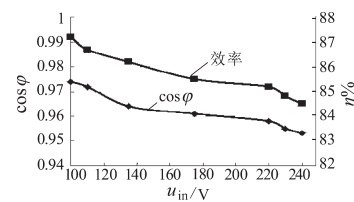


图7 效率及PF和输入电压的关系曲线

Fig.7 Efficiency and PF with the variation of input voltage

### 4 结论

本文提出了基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源,详细分析了它的工作原理,推导了其功率因数表达式。它属于单级变换器,不需要额外的控制回路,能够实现功率因数校正功能。实验结果表明,基于Cuk PFC变换器的LED驱动电源在输入电压100~240 V之间的功率因数均大于0.95,达到了功率因数校正的目的,且输出电流上

无工频纹波叠加纹波,有效地降低了流过LED串电流的2倍工频纹波,解决了LED工频频闪问题,整个LED驱动电源的效率最高达到了87.2%。

#### 参考文献

- [1] 廖志凌,阮新波. 半导体照明工程的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9):106-111.
- [2] Chiu H J, Huang H M, Yang H T, *et al.* An Improved Single-stage Flyback PFC Converter for High-luminance Lighting LED Lamps [J]. International Journal of Circuit Theory & Applications, 2008, 36(2):205-210.
- [3] IEC 61000-3-2. Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current $\leq$ 16A per Phase)[S]. IEC Electrotechnical Standard, 2009.
- [4] Lamar D G, Zuniga J S, Arias M, *et al.* A Very Simple Control Strategy for Power Factor Correctors Driving High-brightness LEDs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(8): 2032-2042.
- [5] Zhang J, Zeng H, Jiang T. A Primary-side Control Scheme for High-power-factor LED Driver with TRIAC Dimming Capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11):4619-4629.
- [6] Xu Y Z, Lin W M, Xu Y C, *et al.* Inductor Optimizes Design for BCM BUCK-PFC in LED Driver[C]//IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2011:2264-2267.
- [7] 沈霞,王洪诚,许瑾. 基于SEPIC变换器的高功率因数LED照明电源设计[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1):41-46.
- [8] Lamar D G, Fernandez M, Arias M, *et al.* Tapped-inductor Buck HB-LED AC-DC Driver Operating in Boundary Conduction Mode for Replacing Incandescent Bulb Lamps [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4329-4337.
- [9] Wilkins A, Veitch J, Lehman B. LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PAR1789 Update [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010:171-178.
- [10] 阎铁生,许建平,曹太强,等. 基于二次型BuckPFC变换器的无频闪无变压器LED驱动电源[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):512-519.
- [11] 王舒,阮新波,姚凯,等. 无电解电容无频闪的LED驱动电源[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):173-178.
- [12] Deng E, Cuk S. Single Stage, High Power Factor, Lamp Ballast [C]//Applied Power Electronics Conference, 1994: 441-449.
- [13] Chan C H, Pong M H. Interleaved Boost Power Factor Corrector Operating in Discontinuous Inductor Current Mode [C]//Proceedings of Power Conversion Conference, 1997, 1:405-410.
- [14] Li X, Xu D, Zhang X. Low Cost Electronic Ballast with Buck Converter as PFC Stage [C]//2006, CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009:1-5.

收稿日期:2018-10-22

修改稿日期:2019-01-31