

# 有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路\*

胡成龙, 薛凌云\*

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** LED 理想的驱动方式是恒流驱动, 在输出端常采用电解电容进行滤波, 但电解电容的寿命与 LED 寿命不匹配; 峰值电流控制是实现恒流驱动的常用控制方式, 但该方式仅控制了流过 LED 的峰值电流, 而未精确地控制其平均电流, 这对 LED 的发光效率、可靠性等都有较大的影响。为解决以上问题, 将省略了滤波电容的有源纹波补偿电路结构与电流平方控制技术应用于 LED 驱动电路中, 基于电流平方控制对平均电流的控制, 以及有源纹波补偿电路对纹波电流的补偿, 开展了该驱动电路工作原理的研究及分析, 并基于 PSIM6.0 进行了仿真验证, 最后进行了实物仿真。仿真及研究结果表明: 通过电流平方控制可以精确地控制平均电流, 并且有源补偿环节可以全补偿由于省略滤波电容所带来的电流纹波, 使流过 LED 的电流为近似直流。

**关键词:** LED 驱动电路; 降压; 有源纹波补偿; 电流平方

中图分类号: TM131; TM923.34

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1329-04

## Step-down LED drive circuit based on active ripple compensation and current square control

HU Cheng-long, XUE Ling-yun

(Department of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The ideal way to drive LED is constant current driving, and the electrolytic capacitor for filtering is adopted in output terminal, but the life-span of electrolytic capacitor cannot match well with the LED's. Peak current control is a commonly used control mode to realize the constant driving for LED, but peak current control can only control the peak current which flows through the LED and can not precisely control its average current, thus the luminous efficiency and reliability of LED are greatly affected. Aiming at solving these problems, the active ripple compensation structure omitting the filter capacitor and the current square control technique were applied in LED's driving circuit. Based on the average current, controlled by the current square control technique and the current ripple compensated by the active ripple compensation structure, the working principle of the driving circuit was researched and analyzed, and the simulation based on PSIM6.0 and the physical simulation was carried out at last. The simulation results indicate that the current square control technique can precisely control the average current, and the active ripple compensation structure can fully compensate the current ripple which results from omitting the filter capacitor and makes the LED's current approximately const.

**Key words:** LED driving circuit; step-down; active ripple compensation; current square control

## 0 引 言

LED 光源以其长寿、节能等优点被广泛应用在各个领域, 匹配的驱动电路则是保证其长时间稳定、可靠工作的前提。LED 的  $I/V$  特性、光学特性及热学特性

决定了恒流驱动是 LED 理想的驱动方式, 开关变换器控制是效率最高的一种控制方式<sup>[1-3]</sup>, 可与 LED 的节能特性很好地匹配, 是驱动 LED 的常用控制结构。

峰值电流控制方式是开关变换器驱动 LED 常用的反馈控制模式, 但峰值电流控制仅能控制峰值电流而不

收稿日期: 2012-05-17

基金项目: 浙江省教育厅科研计划资助项目(Y201017957)

作者简介: 胡成龙(1986-), 男, 山东济宁人, 主要从事检测技术与自动化装置方面的研究. E-mail: huchenglong@163.com

通信联系人: 薛凌云, 女, 教授, 博士, 硕士生导师. E-mail: xly@hdu.edu.cn

能精确控制平均电流,许多学者提出了电流平方控制、PID 控制、模糊控制等控制方式来提高系统的鲁棒性<sup>[4-7]</sup>,PID 及模糊控制虽不依赖于精确的模型,但控制参数的整定困难,在实际应用中并不多见,而电流平方控制在峰值电流的基础上增加一个电流环即可实现对平均电流的控制;基于峰值电流控制的 LED 驱动电路结构中省略了输出端的滤波电容,采用单一的峰值电流控制致使流过 LED 的电流仍存在纹波,故许多补偿方法也不断提出用来减小、甚至消除电流纹波<sup>[8-13]</sup>,如:双变换器补偿、耦合电感补偿、组合结构补偿、纹波交错补偿、有源纹波补偿等。相对于其他补偿,有源纹波补偿不存在同步、元器件匹配及精度等问题。

本研究采用电感电流的双环控制,并采用有源纹波补偿对峰值纹波电流进行补偿。电流平方控制引入的积分环节可精确地控制流过 LED 的平均电流,但仍存在电流纹波;有源补偿电路结构通过采样电感电压实现对电流纹波信息检测,并进行电流纹波的补偿,使流过负载端电流为近似直流。

## 1 驱动电路设计

### 1.1 电流平方控制 Buck 型 LED 驱动电路特点

电流平方控制 Buck 型 LED 驱动电路结构如图 1 所示。控制回路由误差放大器 A1 和 A2 及其外围电路组成。图 1 中运算放大器 A1 与其外围电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  组成求差电路;运算放大器 A2、 $R_5$ 、 $C$  组成积分电路。求差电路与积分电路共同组成差分积分电路,并采用其输出与斜坡补偿的线性组合作为电流内环的控制信号。

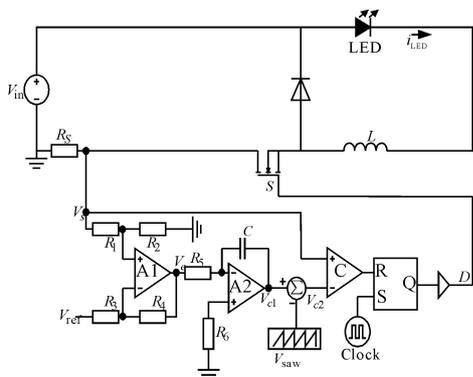


图 1 电流平方控制 Buck 型 LED 驱动电路结构

该电路采用电流双环控制,使系统具有较快的响应速度,同时积分环节的引入可以消除平均电流的稳态误差,从而可对流过 LED 的平均电流进行精确控制,除此之外,积分环节使电感电流平缓的上升到稳态值,改善了系统的启动性能。虽然电流平方控制可以

控制平均电流,但由于省略了输出滤波电容,负载电流仍有较大的电流纹波。

### 1.2 有源纹波补偿 Buck 型 LED 驱动电路特点

文献[8]提出了有源纹波补偿的电路结构,结构如图 2 所示。由图 2 可发现功率级主电路由开关管、电感及续流二极管组成,并且工作在连续导通模式;三极管为纹波补偿电路,对电感纹波电流进行补偿。

由于电路结构中省略了滤波电容,这一方面缩小了电路结构的容积比,有利于 LED 驱动电源的微型化;另一方面,由于滤波电容的寿命远远小于 LED 光源的寿命,滤波电容的省略将会解决 LED 驱动电源与 LED 寿命不匹配的问题。但省略滤波电容的同时会给电路带来较大的电流纹波,这与由 LED 的电学特性、光学特性及热学特性所得到的恒流控制是相矛盾的,采用有源补偿电路可很好地解决该问题。

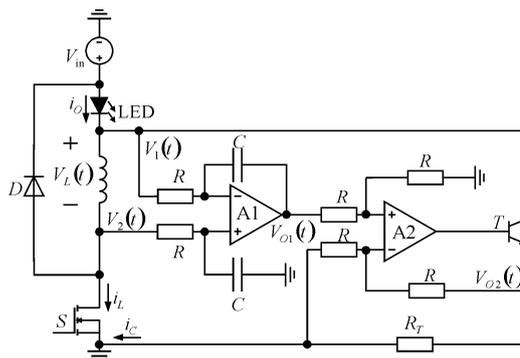


图 2 NPN 实现 Buck 型 LED 驱动有源补偿

### 1.3 有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路设计

将图 1 与图 2 相结合,即可得到有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路结构,该电路结构共包含两个环节:电流平方控制环节和纹波电流检测及补偿环节。电流平方控制通过采样电感电流实现双环控制,具有较快的响应速度,并且该结构只需要一个采样电阻,这不仅减小了电路容积比,同时也降低了电源的温升。有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路包括控制和补偿两个主要部分,具体工作原理如下:

(1) 电流平方控制环节包括以下两个工作状态。

第 1 个工作状态。Clock 时钟使 RS 触发器置位,开关 S 闭合。检测电阻  $R_s$  上的电压  $V_s$  近似线性增加,控制电压  $V_{c1}$  由参考电压与采样电压的差值积分,且  $V_{c1}$  随着  $V_s$  的上升而下降,  $V_{c1}$  经过斜坡补偿后产生控制电压  $V_{c2}$ , 由于二者只相差一个斜坡补偿信号,  $V_{c1}$ 、 $V_{c2}$  具有相同的变换规律。当采样电压  $V_s$  上升到与  $V_{c2}$  相等时, Buck 主电路进入第 2 个工作状态。

第 2 个工作状态。RS 触发器复位,开关 S 关断。此时检测电阻  $R_s$  没有电流流过,因此采样电压  $V_s$  为零。由

于差分积分环节正向输入端输入为零,控制电压  $V_{c1}$ 、 $V_{c2}$  将线性增加,直到 Clock 时钟到来,使 RS 触发器重新置位。

由于检测电阻上的检测电压为开关导通期间的电流信号,参考电压需要乘以一个比例系数  $K = D$ ,研究者在选择电路参数时可根据该公式进行适当调整。

(2)当电路达到稳态时,电感电流的波形如图 3 所示。通过电感电流的检测与补偿环节可使流过 LED 负载的电流为恒定直流,本研究以图 2 中的 NPN 管为例陈述该环节的工作原理:

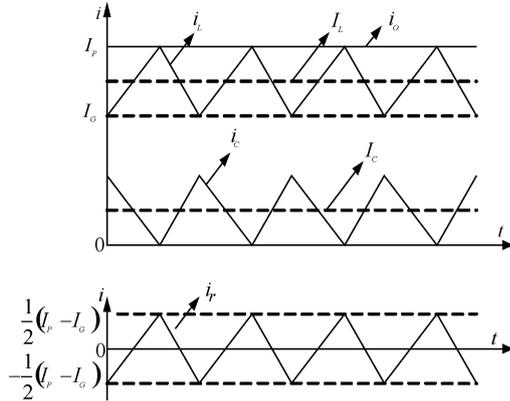


图 3 纹波电流检测及补偿示意图

当电路稳态工作时,电感电流  $i_L(t)$  可分解为直流量  $I_L$  和交流分量  $i_r(t)$  的叠加,如图 3 所示,用公式可表示为:

$$i_L(t) = I_L + i_r(t) \quad (1)$$

假设各电路元件均为理想元件,忽略电感、电容的寄生参数,并且对运算放大器 A1 用单电源供电时(省去负电源,正电源由  $V_{in}$  直接供电),根据纹波检测电压与电感电压和电流的关系,可求得图 2 中三极管  $T$  的集电极电流,即补偿电流为:

$$i_c(t) = \frac{L}{R_T RC} \left[ \frac{1}{2}(I_P - I_C) - i_r(t) \right] \quad (2)$$

为实现电感纹波电流的全补偿,补偿电路的电流输出应与电感纹波电流反向,由式(2)可知,只需满足  $L/R_T/R/C = 1$  即可。此时三极管  $T$  的补偿电流为:

$$i_c(t) = \frac{1}{2}(I_P - I_C) - i_r(t) \quad (3)$$

由式(1)可知电感电流为:

$$i_L(t) = I_L + i_r(t) = \frac{1}{2}(I_P + I_C) + i_r(t) \quad (4)$$

则经纹波补偿后流过 LED 的电流为:

$$i_o = I_L + I_C = I_P \quad (5)$$

综上所述,当满足关系  $L/R_T/R/C = 1$  时,补偿电路可对电感纹波电流进行全补偿,使得流过 LED 的电流为恒定直流,且其值为  $I_P$ 。

## 2 驱动电路仿真验证

### 2.1 PSIM6.0 仿真

为验证理论分析,本研究采用 PSIM6.0 对有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路进行仿真实验。电路设置时参数选择应满足:  $R_4/R_3 = R_1/R_2 = K = D = (V_F + R_{LED} \cdot I_{LED})/V_{in}$  及  $L/R_T/R/C = 1$ 。

具体的设计参数为:  $V_{in} = 12 \text{ V}$ ,  $V_{ref} = 0.035 \text{ V}$ ,  $L = 220 \mu\text{H}$ ,  $R_s = 0.1 \Omega$ ,  $f = 200 \text{ kHz}$ ,  $R_1 = R_4 = 2.8 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = R_6 = 100 \Omega$ ,  $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_2 = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $R_T = 2.2 \Omega$ 。

LED 等效为电压源与等效电阻的串联,其中:  $V_F = 3 \text{ V}$ ,  $R_{LED} = 1.2 \Omega$ ,其额定电流为  $0.35 \text{ A}$ 。

电路仿真波形如图 4、图 5 所示,可知流过 LED 的电流为恒定  $0.35 \text{ A}$  电流,此时对应占空比约为  $30\%$ 。

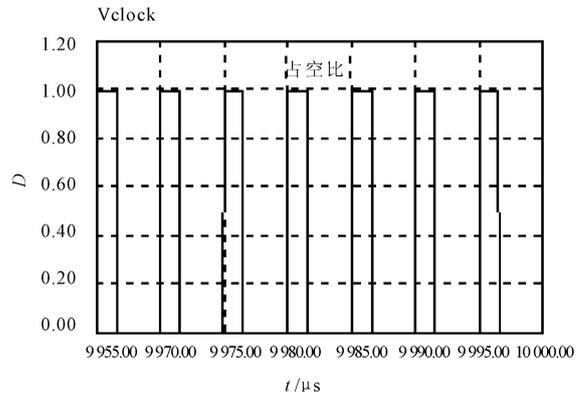


图 4 占空比波形图

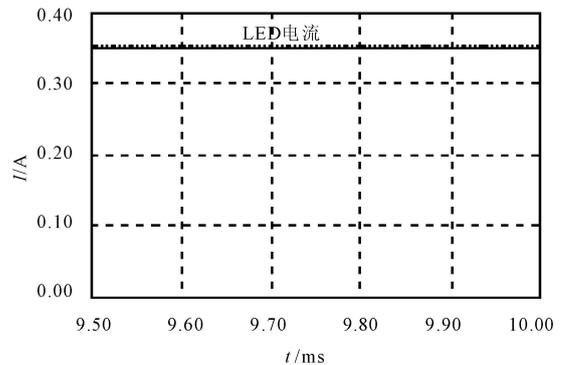


图 5 LED 电流波形图

### 2.2 实物仿真

控制芯片选用 UC3843,具体实现电路及仿真结果如图 6~8 所示。

由图 7 可知开关管的工作频率为  $192.568 \text{ kHz}$ ,接近理论设定值  $200 \text{ kHz}$ ,并且占空比约为  $35\%$  左右,这是由于 LED 导通电阻及其他元器件寄生参数的存在而导致电源需输出较多的能量才能保证流过 LED 的电流相同。

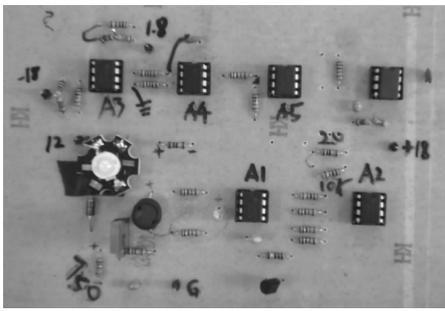


图 6 实物仿真电路结构图

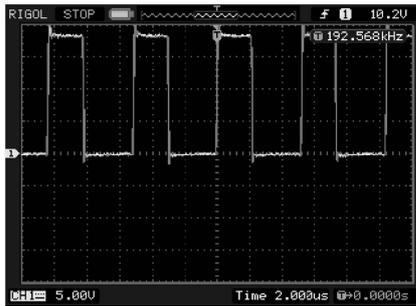


图 7 实物仿真占空比波形图

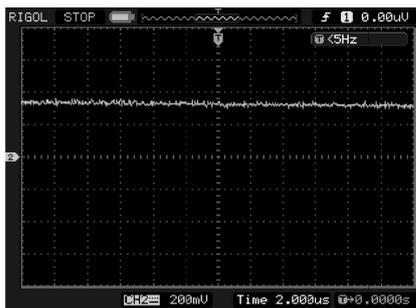


图 8 实物仿真 LED 电流

流经 LED 的电流波形如图 8 所示。所测电流经过  $1 \Omega$  的电阻进行采样,由图 8 可知 LED 电流约为  $0.34 \text{ A}$ ,并且频率小于  $5 \text{ Hz}$ ,为近似直流,比较接近理论值  $0.35 \text{ A}$ 。

### 3 结束语

有源纹波补偿电流平方降压型 LED 驱动电路结构中省略了滤波电容,解决了 LED 驱动电源与 LED 寿命不匹配的问题,同时减小了电路结构的容积比;控制环节采样电感电流作为电流平方控制的反馈控制信号,使系统具有较快的响应速度及较强的负载调整力,并且积分环节的引入使电感电流平缓地上升到稳态值,改善了系统的启动性能,与此同时电流采样环节仅需一个采样电阻就可完成电流双环控制,不仅减少了元器件的数量还降低了温升;有源纹波补偿环节全补偿了由于省略滤波电容所带来的电流纹波,使流过 LED 的电流为恒定直流,从而可以精确地控制 LED 的

光通量,保证其长时间可靠、稳定地工作。

### 参考文献 (References):

- [1] CHEN Xiao-ming, TAO Ji-li, ZHU Yong, et al. Optimized Fuzzy Control for LED Constant Current Driver Design [C]//2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. China: [s. n.], 2010: 1124-1127.
- [2] YANG Cheng-chung, WANG Chen-yu, KUO T H. Current-Mode Converters with Adjustable-Slope Compensating Ramp [C]// IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Taiwan: [s. n.], 2006:654-657.
- [3] KAPUN A, MILANOVIC M, KORELIC J. Voltage Ripple Cancellation in Buck Converter based on Hybrid Structured Connection [C]// 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. Portoroz: [s. n.], 2006:112-117.
- [4] PENG Yan, LI Xiao-han, HE Hua-ping. Design of adaptive fuzzy logic controller for LED driving circuit[C]// 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE). Wuhan: [s. n.], 2011:1288-1291.
- [5] CHERN T L, PAN P L, LIAO H Y, et al. Single-stage Buck Type LED Lighting Driver with New Design of Current Integral Control[C]// 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Beijing: [s. n.], 2011: 2197-2202.
- [6] 裴 倩,王正仕,陈辉明,等. HB-LED 驱动用恒流 Buck 变流器控制方法研究[J]. 电源技术与应用,2010(2):73-76.
- [7] 宋晓娟. 电流平方控制的大功率 LED 驱动电路[J]. 电源技术,2010,134(6):586-588.
- [8] 王官涛. 有源纹波补偿降压型 LED 驱动电源[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院,2011.
- [9] TANG Zhi-de, WANG Guan-tao, XIE Xiao-hui. White LED Power Supply based on Buck Converter with Active Ripple Compensation [C]// 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CEC-Net). China: [s. n.], 2011: 943-946.
- [10] SATO T, NABESHIMA T, NISHIJIMA K, et al. DC-DC Converters with Ripple Cancel Circuit [C]// Twenty-Seventh International Telecommunications Conference. Japan: [s. n.], 2005:527-532.
- [11] FU C M, LU D D, SATHIAKUMAR S. A Novel Method to Reduce the Operating Temperature of High Power Light-emitting Diode [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference. Australia: [s. n.], 2008: 1-6.
- [12] 唐治德,王官涛,杨 红. 一种新颖的 BUCK 型 LED 驱动电路[J]. 电子技术,2011,30(6):45-48.
- [13] SATO T, NABESHIMA T, BISHIJIMA K, et al. DC-DC Converters with Ripple Cancel Circuit [C]// Twenty-Seventh International Telecommunications Conference. Berlin: [s. n.], 2005: 527-532.