

· 自动化技术 ·

# 基于DSP的双输入BUCK变换器在LED驱动器中的应用

陈 勇, 周 俊

(电子科技大学能源科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**提出一种将双输入Buck(TIBUCK)变换器应用于LED驱动器的方案,并详细分析该电路的性能特点。该TIBUCK变换器采用电压模式控制,由DSP作为控制核心,能够很好地调节输出电流,使LED工作在恒流状态。仿真和实验结果表明,TIBUCK变换器在降低开关管和二极管电压应力的同时实现了对输出电流的恒流控制,从而证明该变换器作为LED驱动器中的后级恒流部分是可行的。

**关键词** 恒流; DSP; LED; TIBUCK变换器

中图分类号 TM46

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.010

## DPS Based Two-Input BUCK Converter with Application in LED Driver

CHEN Yong and ZHOU Jun

(School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** This paper presents a scheme that the two-input BUCK (TIBUCK) converter is applied to the LED drivers. The performance characteristics of the circuit are analyzed in detail. The TIBUCK converter is designed to operate in the voltage control mode governed by DSP, thus the output current can be adjusted well and the LEDs can then work in the constant current mode. The simulation and experimental results show that the voltage stress of switch and diode in the TIBUCK converter are reduced, and the constant current control for the output current is realized at the same time. Thereby, as the constant-current part of the LED driver, the feasibility of the TIBUCK converter is proved.

**Key words** constant current; DSP; LED; TIBUCK converter

在能源危机和全球气候变暖日益严重的今天,节能与环保已经成为现今社会最为关心的问题之一<sup>[1]</sup>。照明作为消耗能源的重要方面之一,其耗电量在每个国家的发电总量中占有不可忽视的比重。LED开始进入照明领域,掀起了真正意义上的照明革命<sup>[2]</sup>。与传统照明光源相比,LED光源具有发光效率高、有效寿命长、安全环保、易于维护等一系列优点<sup>[3]</sup>。因此,LED照明光源被称为21世纪的新一代光源。LED照明作为一种高效、节能、环保、长寿命的照明光源,市场前景十分广阔<sup>[4]</sup>。随着LED照明受到越来越大的重视,LED行业发展的热潮已经到来,LED产业必将全方位的发展。LED驱动器作为整个LED照明产业的一部分,也随之成为了关注的热点并迅速发展。

LED光源不是由220 V的交流市电供电,而是由3 V左右的低电压驱动,所以必须要设计相应的变换

电路以满足不同LED组合对驱动器的要求。根据供电方式的不同,LED驱动器可以分为直流供电驱动器(DC/DC)和交流供电驱动器(AC/DC)。DC/DC驱动器适合于由蓄电池、太阳能电池等直流电源供电的情况;AC/DC驱动器适用于由市电供电的情况,如路灯照明、景观照明等LED灯具<sup>[5]</sup>。

针对LED驱动器的研究主要有两方面:1)新型的电力电子电路结构简化驱动器,集成双降压-升压Buck电路提高功率因素<sup>[7]</sup>。文献[8-9]的简化电路用于颗LED灯珠,主要针对小功率LED,对于大功率LED电路就很难使用。2)大功率的LED,一般大于20 W,主要研究去电解电容的分析<sup>[10-11]</sup>和各种结构的驱动电路<sup>[12-13]</sup>。

本文针对96 W的大功率LED组,由4组24 W的LED组成。大功率LED与小功率LED不同是电流更大,更容易电流波动。根据LED的伏安特性,当加

收稿日期: 2014-06-12; 修回日期: 2014-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(61105030); 四川省支撑计划(2013GZ0054); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2011J021)

作者简介: 陈勇(1977-),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事电机控制技术、电力电子技术及先进控制理论方面的研究。

在LED光源两端的正向电压高于LED的导通电压时,微小的正向电压变化将会引起正向电流较大的变化,因此LED驱动器采用恒流驱动策略。

本文提出将TIBUCK变换器应用于LED驱动器中,既可以作为直流电源供电的DC/DC变换器,也可以作为交流供电的后级DC/DC变换器,为LED负载提供恒定的电流。该TIBUCK变换器采用DSP芯片作为控制核心,以实现对流过LED负载的电流进行数字控制,使LED负载工作在最佳状态。

### 1 TIBUCK变换器分析

TIBUCK变换器的电路结构如图1所示,它是在Buck变换器的基础上增加一路输入信号构成,其作为电源的后置调节器具有以下优点<sup>[14]</sup>:1) 开关管和二极管所承受的电压应力较低,低于输入电压和输出电压;2) 电路中的电感及电容取值可以很小,减小了整个电路的体积;3) 这种拓扑可以获得较高的效率。

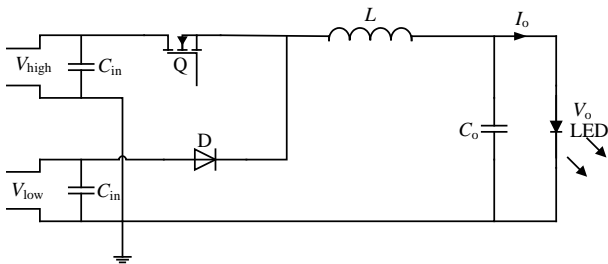


图1 TIBUCK变换器的电路结构

当TIBUCK变换器的输出电感L被设计为工作在电流连续模式(CCM)时,一个周期内电感L的平均状态方程为:

$$D(V_{high} - V_o) + (1 - D)(V_{low} - V_o) = L \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

式中, D为开关管Q的占空比。电路工作在稳定状态时,有  $di_L/dt = 0$ , 因此,由式(1)可得输入电压和输出电压的关系为:

$$V_o = (V_{high} - V_{low})D + V_{low} \quad (2)$$

由上式可知,输出电压  $V_o$  在  $V_{low}$  和  $V_{high}$  之间变化,短路时  $V_o$  不能完全降为零,因此短路保护只能由前级电路来实现。而TIBUCK变换器多用于后级电路,所以当TIBUCK电路的电流超出调节范围或输出短路时,可以通过控制相关芯片关断前一级电路,从而实现对驱动器及LED负载的保护。

由图1可知,开关管所承受的最大电压应力 ( $V_{Qmax}$ )和二极管所承受的最大电压应力 ( $V_{Dmax}$ )为:

$$V_{Qmax} = V_{Dmax} = V_{high} - V_{low} \quad (3)$$

为了保证TIBUCK电路工作在电感电流连续模

式,由文献[7]可知, L的取值必须满足:

$$L > \frac{RT_s (\sqrt{\lambda} - 1)^2}{2 \lambda - 1} \quad (4)$$

式中,  $\lambda = V_{high} / V_{low}$ ; R为输出电阻;  $T_s$ 是开关周期。

当输入电压  $V_{high}$  和  $V_{low}$  接近时,开关管Q和二极管D所承受的电压应力很小,电感L的取值也较小,同时TIBUCK变换器可以获得较高的效率<sup>[15]</sup>。图2所示为转换后的TIBUCK变换器,在图2a中,其输入电压分别转换为  $V_{high} - V_{low}$  和  $V_{low}$ , 输出负载电阻和电容被分为两部分,通过电阻的输出电压也被转换为  $V_o - V_{low}$  和  $V_{low}$ 。转换后的电阻阻值为:

$$R_1 = \frac{V_o - V_{low}}{V_o} R \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{V_{low}}{V_o} R \quad (6)$$

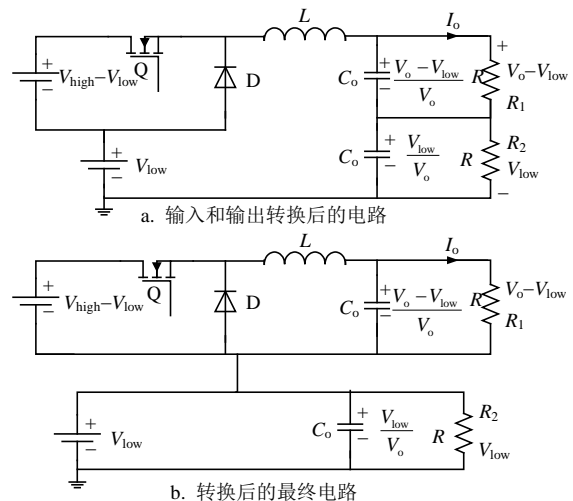


图2 转换后的TIBUCK变换器

由图2a可知,两个输入电源中点的电压和通过输出电阻  $R_2$  的电压相等,因此,图2a可以转换为图2b的结构。图2b中,TIBUCK变换器等价于有一个点相连接的两个变换器的组合。图2b的上部分电路等效为一个BUCK电路,其输入电压为  $V_{high} - V_{low}$ , 输出电压为  $V_o - V_{low}$ , 负载为  $R_1$ ; 下部分电路的输入和输出电压均为  $V_{low}$ , 负载为  $R_2$ , 所以它的效率可以达到100%。因此,输出功率  $P_o = V_o^2 / R$  可以分为以下两部分:

1) 等效为图2b下部分电路的输出功率为  $P_1$ , 它的效率为  $\eta_B$ , 则有:

$$P_1 = \frac{(V_o - V_{low})V_o}{R} \quad (7)$$

2) 等效为图2b下部分电路的输出功率为  $P_2$ , 其效率为100%, 则有:

$$P_2 = \frac{V_o V_{low}}{R} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知,当TIBUCK变换器的输出功率 $P_o$ 一定时,输出电压 $V_o$ 越接近输入电压 $V_{low}$ ,等效为BUCK电路部分的输出功率 $P_1$ 就越小,输出功率 $P_2$ 越大,而 $P_2$ 几乎是无损耗的,因此,TIBUCK变换器可以获得很高的效率:

$$\eta_{TB} = \frac{P_1 + P_2}{P_1/\eta_B + P_2} \quad (9)$$

由以上分析可知,通过调节两个输入电压之间的比例,即可使TIBUCK变换器获得较高的效率。本文设计中,TIBUCK变换器的前级电路去掉了大容量的电解滤波电容,考虑到输入电压的变化范围及LED路灯负载所需的驱动电流,选取TIBUCK电路的额定输入电压为: $V_{high} = 60 \text{ V}$ , $V_{low} = 30 \text{ V}$ 。

## 2 电感电流连续模式下TIBUCK变换器的小信号模型

控制环路作为开关电源中很重要的一部分,其设计与主电路的结构及参数选择有着紧密的联系。要实现开关电源的稳定性分析,对其建立一个完整的小信号模型是有必要的。开关电源是一个非线性系统,用解析的方法建模只能近似建立其在稳态时的小信号扰动模型。而开关电源一般工作在稳态,因此根据小信号扰动模型设计的控制环路能够满足开关电源的性能要求<sup>[16]</sup>。下面将对电感电流连续模式下TIBUCK变换器的小信号模型进行分析。

电压模式控制(VMC)方式仅采用单电压环进行控制,比较简单,易于实现,能够满足大多数情况下的性能要求<sup>[17]</sup>。本文设计的TIBUCK变换器采用电压模式控制实现对输出电流的控制,其电路如图3所示。对流过LED的输出电流进行采样,经过数字PI算法由DSP实现对LED路灯驱动器的恒流控制。

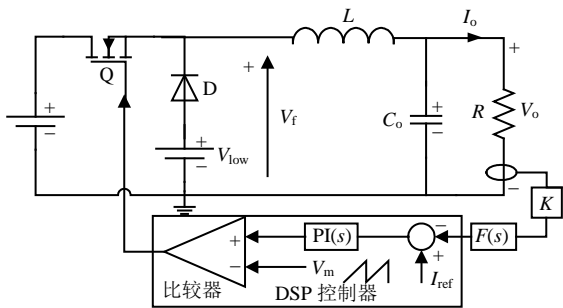


图3 电压模式控制的TIBUCK变换器

为了得到TIBUCK变换器的小信号模型,由图3可知:

$$V_f = V_{high}D + V_{low}(1-D) \quad (10)$$

$$V_f - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (11)$$

$$I_C = C \frac{dV_o}{dt} \quad (12)$$

$$V_o = I_o R \quad (13)$$

式中, $V_f$ 为输出滤波器的输入电压; $I_L$ 为流过电感的电流; $I_C$ 为经过电容的电流; $I_o$ 为流过LED负载的输出电流; $R$ 为LED负载的等效电阻。由于电路中的各状态变量总是围绕稳态值波动,因此对式(10)~式(13)施加扰动信号可以得到:

$$V_f + v_f = (V_{high} + v_{high})(D+d) + (V_{low} + v_{low})[1-(D+d)] \quad (14)$$

$$(V_f + v_f) - (V_o + v_o) = L \frac{d(I_L + i_L)}{dt} \quad (15)$$

$$I_C + i_C = C \frac{d(V_o + v_o)}{dt} \quad (16)$$

$$V_o + v_o = (I_o + i_o)R \quad (17)$$

式(14)~式(17)分别由式(10)~式(13)的稳态值加上小信号波动值形成,其中小写字母为对应信号的波动量。将式(10)~式(17)分别相减并省略掉两个波动量的乘积可得:

$$v_f = v_{high}D + v_{low}(1-D) + (V_{high} - V_{low})d \quad (18)$$

$$v_f - v_o = L \frac{di_L}{dt} = Ls i_L \quad (19)$$

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = C s v_o \quad (20)$$

$$v_o = i_o R \quad (21)$$

TIBUCK变换器作为后置调节器,其输入电压经过前级电路处理后得到,所以它的输入电压纹波的频率相对于TIBUCK变换器的开关频率很小,输入电压在开关频率的频带范围内可以看作是恒定的,即可假设 $v_{high} = 0$ , $v_{low} = 0$ 。联立式(18)~式(21),可得到输出电流 $i_o$ 和输出滤波器的输入电压 $v_f$ 以及输出电流 $i_o$ 和占空比 $d$ 的小信号传递函数分别为:

$$G_{i_o-v_f} = \frac{i_o}{v_f} = \frac{1}{s^2 LCR + sL + R} \quad (22)$$

$$G_{i_o-d} = \frac{i_o}{d} = (V_{high} - V_{low}) \frac{1}{s^2 LCR + sL + R} \quad (23)$$

如图3中的电压模式控制环路所示,反馈信号采样流经LED负载的输出电流,可以得到占空比 $d$ 的小信号表达式为:

$$d = \frac{PI(s)}{V_m} (i_{ref} - KF(s)i_o) \quad (24)$$

式中, $PI(s)$ 为PI调节器; $V_m$ 为三角波的峰值; $i_{ref}$ 为基准电流信号 $I_{ref}$ 的波动量; $K$ 为电流传感器的增益;

$F(s)$ 为电流传感器输出信号的低通滤波器。联立式(23)和式(24)可得系统的闭环传递函数为:

$$G_{i_o-i_{ref}} = \frac{i_o}{i_{ref}} = \frac{(V_{high} - V_{low}) \frac{PI(s)}{s^2 LCR + sL + R}}{V_m + (V_{high} - V_{low}) \frac{PI(s)F(s)K}{s^2 LCR + sL + R}} \quad (25)$$

通过上列传递函数, 可以设计合适的PI控制器以减小TIBUCK变换器输出电流的纹波。

### 3 仿真及实验结果分析

通过上述对TIBUCK变换器的分析, 利用Matlab/Simulink对基于电压模式控制的TIBUCK变换器进行了仿真, 并分析了仿真结果。在仿真的基础上, 搭建了一台样机, 对其进行调试, 并分析了

样机的测试结果。

#### 3.1 仿真结果分析

基于电压模式控制的TIBUCK变换器的仿真模型如图4所示, 仿真电路的基本参数设定为: 输入电压  $V_{high} = 60\text{ V}$ ,  $V_{low} = 30\text{ V}$ ; 输出电流  $I_o = 0.6\text{ A}$ , 输出功率  $P_o = 24\text{ W}$ , LED等效电阻  $R = 66\ \Omega$ ; 电感  $L = 80\ \mu\text{H}$ , 电容  $C = 10\ \mu\text{F}$ ; 开关频率  $f_s = 100\text{ kHz}$ 。由于TIBUCK变换器一般用于开关电源中的后置调节器, 其输入带有一定的纹波, 设定其输入电压的纹波为额定值的 $\pm 5\%$ , 频率为两倍于工频(50 Hz)的100 Hz。在仿真实验中, 用交流电源代替输入电压的纹波。

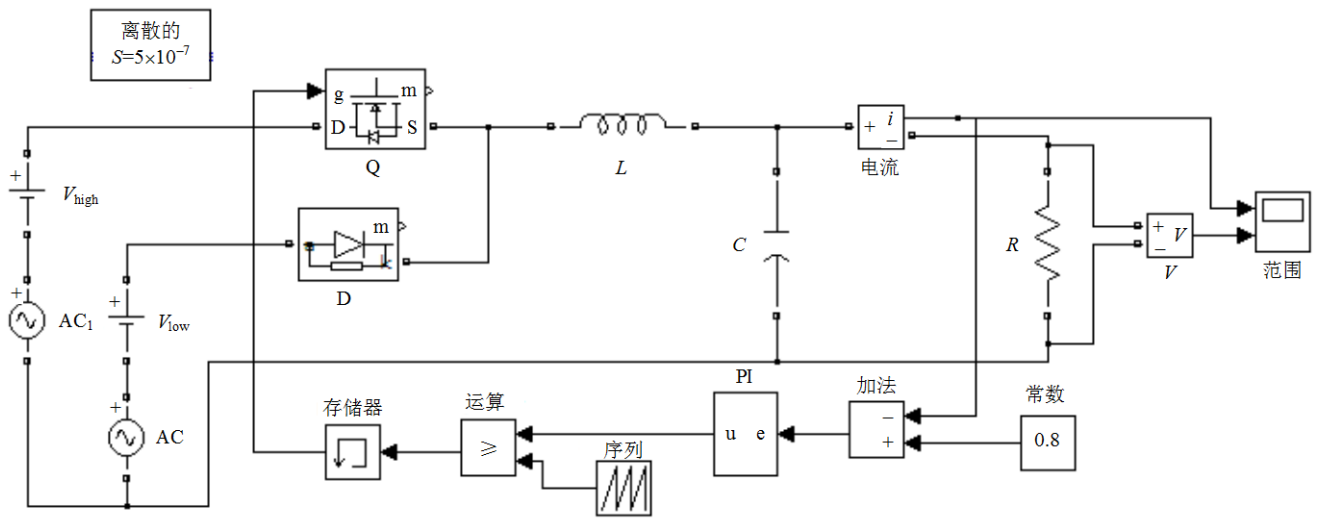


图4 TIBUCK变换器的仿真模型

TIBUCK变换器的输入电压波形如图5所示, 它们是在直流电源的基础上增加一个交流电源构成的, 从而模仿前级电路的输出。图5a为输入电压  $V_{high}$ , 其波动范围为57~62 V; 图5b为输入电压  $V_{low}$ , 其波动范围为28.5~31.5 V。

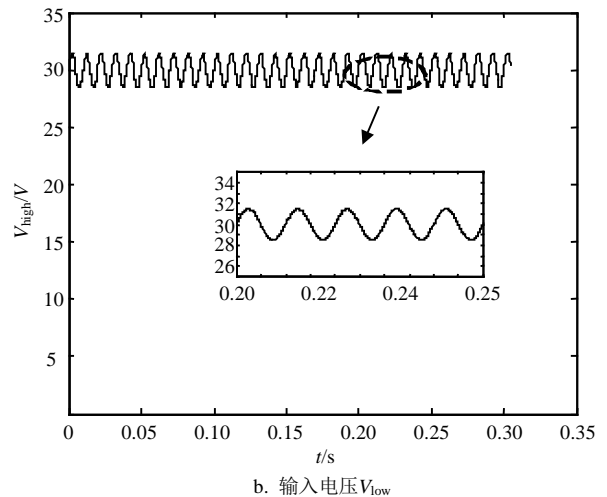
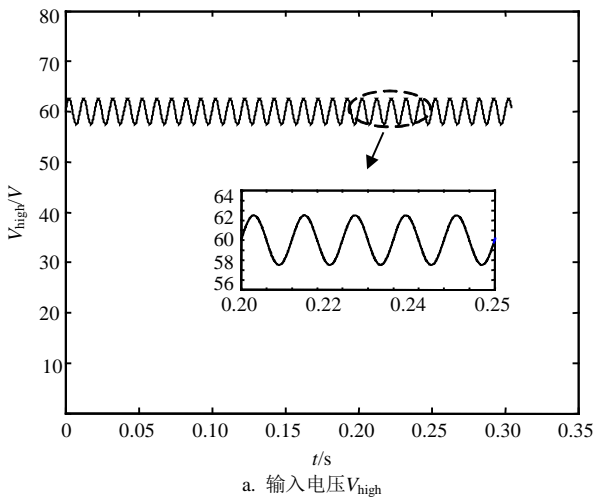
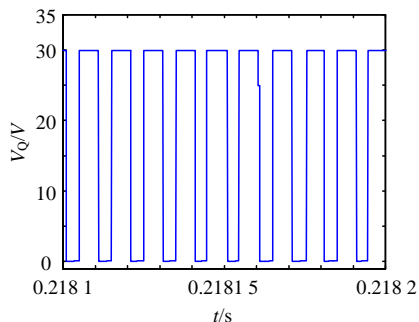


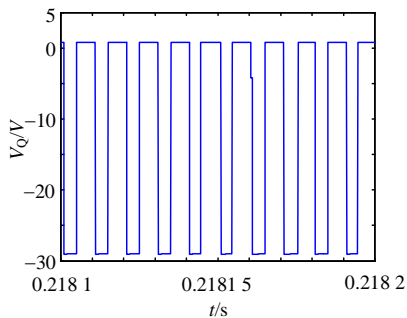
图5 TIBUCK变换器的输入电压波形

图6所示为开关管Q和二极管D所承受的电压应力波形。从波形图中可以看出, 它们所承受的最大电压应力为两路输入电压之差, 电压应力较小, 因此可以选择耐压低、内阻小的开关管和正向导通电

压低的二极管，从而提高TIBUCK变换器的效率。

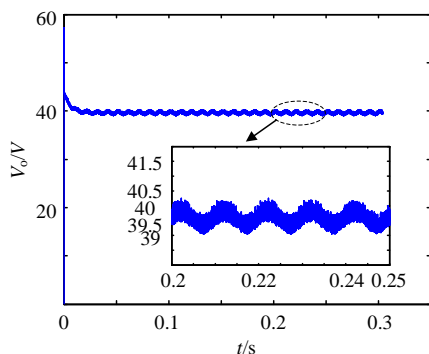


a. 开关管Q电压应力 $V_Q$

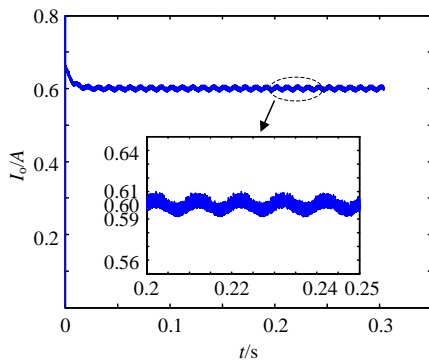


b. 二极管D电压应力 $V_D$

图6 开关管Q和二极管D所承受的电压应力波形



a. 输出电压 $V_o$



b. 输出电流 $I_o$

图7 TIBUCK变换器的输出电压及电流波形

TIBUCK变换器的输出电压和电流波形如图7所示，可以很好地处理前级电路带来的纹波，输出纹波较小。从图7b可以看出，输出电流稳定在0.6A，

且在0.02 A的范围内上下波动，很好地控制了输出电流的纹波，为LED负载提供了稳定的电流。

### 3.2 实验结果分析

在理论分析及仿真的基础上，完成了TIBUCK变换器的硬件电路设计。一个电路板上集成了4组TIBUCK变换器，可以分别驱动4路LED光源，如图8所示，且能够独立的调节各路所需的电流，使其电流恒定。



图8 负载LED

TIBUCK变换器作为LED路灯驱动器的后级电路驱动LED路灯负载的效果如图9所示，4组TIBUCK变换器分别驱动4路LED路灯负载，每一组的输出功率为24 W。

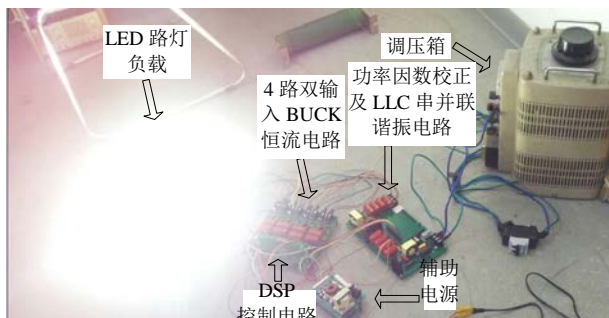
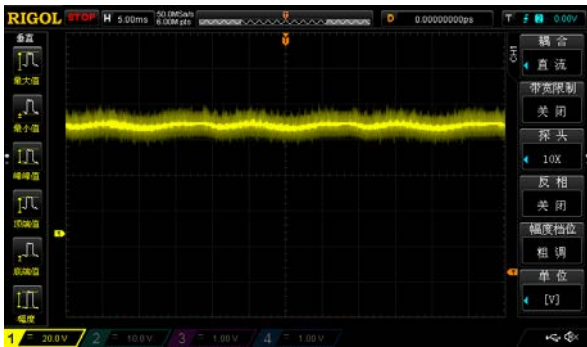


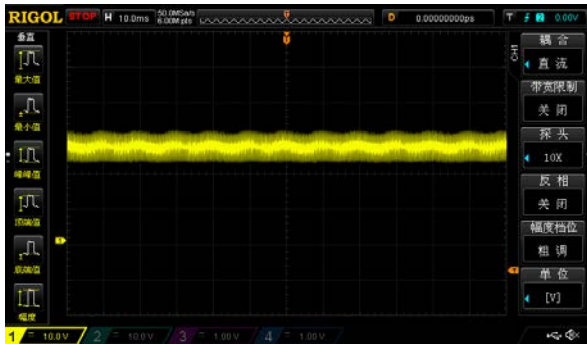
图9 TIBUCK变换器作为后级电路驱动LED路灯负载的效果图

TIBUCK变换器的两组输入电压为前级电路的输出电压，分别为 $V_{high} = 60\text{ V}$ ， $V_{low} = 30\text{ V}$ (由于整个驱动器都没有使用电解电容，所以TIBUCK变换器输入电压有一定的波动)，电压波形如图10所示。

TIBUCK变换器的开关管Q和二极管D所承受的电压 $V_Q$ 和 $V_D$ 的波形如图11所示，其中CH1通道为二极管D所承受的电压 $V_D$ 的波形，CH2通道为开关管Q所承受的电压 $V_Q$ 的波形。从图11中可以看出，它们所承受的最大电压应力约为30 V，为两路输入电压信号之差，电压应力较小，与前面的理论分析和仿真结果一致。因此可以选用耐压值较小的开关管和二极管，从而减小它们的损耗，提高整个变换器的效率。



a.  $V_{high}$



b.  $V_{low}$

图10 TIBUCK变换器的输入电压波形



图11 TIBUCK变换器的开关管Q和二极管D所承受的电压  $V_Q$  和  $V_D$  的波形

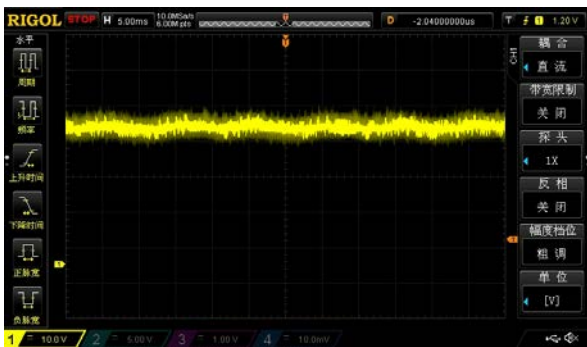


图12 TIBUCK变换器的输出电压波形

本文实验的波形是在负载为电阻的情况下测试的, 因此将输出电流转换为电阻的电压进行测试。TIBUCK变换器的输出电压波形如图12所示。为了和LED路灯负载相匹配, 测试所使用的电阻为65  $\Omega$ ,

输出电压的幅值约为40 V, 有一定的纹波, 在输出电压的10%之内。因此, TIBUCK变换器能够使输出电流稳定在0.6 A附近波动, 从而正常驱动LED路灯负载。

### 4 结 论

本文提出将TIBUCK变换器应用于LED驱动器的后级电路, 并采用DSP芯片作为控制核心以实现为LED负载提供恒定的电流。详细分析了TIBUCK变换器的工作原理, 并利用Matlab/Simulink对基于电压模式控制的TIBUCK变换器进行仿真, 证明了该方案的可行性。在理论分析及仿真的基础上, 制作了一台TIBUCK变换器的样机。样机试验结果表明TIBUCK变换器不仅降低了开关管和二极管的电压应力, 同时也为LED负载提供了恒定的驱动电流, 从而稳定了LED光源的亮度

### 参 考 文 献

- [1] YANG K, CHEN Y Q, LIN B, et al. Thermal design based on thermosiphon heat sink of high-power LED street light[C]//2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics(ICEOE). Dalian, China: [s.n.], 2011: 374-377.
- [2] HUI S Y R, YAN W. Re-examination on energy saving & environmental issues in lighting applications[C]// Proceedings of the 11th International Symposium on Science and Technology of Light Sources. Shanghai, China: [s.n.], 2007: 373-374.
- [3] BOWERS B. Historical review of artificial light sources[J]. IEE Proceedings A, 1980, 127(3): 127-133.
- [4] GU L L, RUAN X B, XU M, et al. Means of eliminating electrolytic capacitor in AC/DC power supplies for LED lightings[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(5): 1399-1408.
- [5] 唐治德, 王官涛, 杨红, 等. 有源纹波补偿BUCK型LED驱动电源[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(12): 40-45. TANG Zhi-de, WANG Guan-tao, YANG Hong, et al. The power supply based on BUCK with active ripple compensation for LED[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(12): 40-45.
- [6] SHEN Yu-nung. Method for driving LED[P]. United States Patent Application Publication, 12172524, 2009.
- [7] ALONSO J M, VINA J, VAQUERO D G, et al. Analysis and design of the integrated double Buck-Boost converter as a high-power-factor driver for power-LED lightings[J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2012, 59(4): 1689-1697.
- [8] 罗全明, 邹灿, 支树播, 等. 二极管钳位型LCL-T半桥谐振恒流LED驱动电源[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(3): 8-14. LUO Quan-ming, ZOU Can, ZHI Shu-bo, et al. Constant current LED driver based on LCL-T half bridge resonant converter with clamping diode[J] Electric Machines and

- Control, 2013, 17(3): 8-14.
- [9] 唐治德, 张晓斌, 王官涛, 等. 峰值电流控制的有源纹波补偿Buck型LED驱动电源[J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(11): 101-106, 112.  
TANG Zhi-de, ZHANG Xiao-bin, WANG Guan-tao, et al. LED Buck power supply with active ripple compensation in peak current control mode[J]. Journal of South China University of Technology, 2012, 40(11): 101-106, 112.
- [10] QIN Y X, CHUNG H S H, LIN D Y, et al. Current source ballast for high power lighting emitting diodes without electrolytic capacitor[C]//Proc 34th Annu IEEE IECON. [S.l.]: IEEE, 2008: 1968-1973.
- [11] GU L L, RUAN X B, XU M, et al. Means of eliminating electrolytic capacitor in AC/DC power supplies for LED lightings[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2009, 24(5): 1399-1408.
- [12] MA H B, LAI J S, FENG QY, et al. A novel valley-fill SEPIC-derived power supply without electrolytic capacitors for LED lighting application[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2012, 27(6) : 3057-3071.
- [13] WANG S, RUAN X B, YAO K, et al. A flicker-free electrolytic capacitor-less AC-DC LED driver[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2012, 27(11): 4540-4548.
- [14] SEBASTIAN J, VILLEGAS P J, NUNO F, et al. High-efficiency and wide-bandwidth performance obtainable from a two-input Buck converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(4): 706-717.
- [15] SEBASTIAN J, VILLEGAS P, NUNO F, et al. A study of the two-input DC-to-DC switching post-regulators[C]//Power Electronics Congress. Cuernavaca: [s.n.], 1996: 35-45.
- [16] 万山明, 吴芳. 开关电源(Buck电路)的小信号模型及环路设计[J]. 电源技术应用, 2004, 7(3): 142-145.  
WAN Shan-ming, WU Fang. Design on small signal model and control loop of switching power supply Buck circuit[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2004, 7(3): 142-145.
- [17] BRAHMI A, ABOUNADA A, RAMZI M. Realization of an analogue voltage mode control approach for a DC/DC step-up converter[C]//International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS'09. Ouazazate: [s.n.], 2009: 253-258.

编辑 漆蓉