

基于两路Cuk改进电路的恒流源

晏玉林,夏焰坤,刘力友

(西华大学 电气与电子信息学院,四川 成都 610039)

摘要:使用恒流源来驱动LED可得到两路相等的输出电流。提出了基于两路Cuk改进电路的恒流源,分析了其电路结构、工作模式和恒流原理,同时推导了其电压、电流和功率表达式。最后搭建的功率为3 W的样机证明了其恒流理论。结果表明:该恒流源利用Cuk变换电路结构中的中间储能电容元件实现对两路LED输出支路的自动恒流,控制其中一路负载电流实现两路恒流;利用Cuk变换电路的升降压得到各路LED负载所需的电压。

关键词:Cuk电路;LED驱动;多路恒流源

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24515

Constant Current Drive Power Supplies Based on Two Cuk Improved Circuits

YAN Yulin, XIA Yankun, LIU Liyou

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University,
Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: In order to achieve equal current, a constant current source should be used to drive the LEDs. A constant current source based on two output Cuk improved circuits was proposed. The circuit structure, working mode and constant current principle were analyzed, and the voltage, current and power expressions were derived. Finally, a prototype with an output power of 3 W was built to prove its constant current theory. The results demonstrate that the constant current source uses the intermediate energy storage capacitor element in the Cuk conversion circuit structure to realize the automatic constant current of the two LED output branches, which controls one of the load currents to automatically achieve two constant currents. The buck-boost voltage of the Cuk conversion circuit is used to obtain the voltage required for each LED load.

Key words: Cuk circuit; LED drive; multiple constant current sources

与传统的白炽灯、荧光灯相比较,发光二极管(LED)因其发光效率高有望成为未来新型光源,并得到广泛应用^[1]。

LED的发光受到电压、电流和封装方式的影响出现不均匀的现象,最容易的解决方法是LED串联,但电压过大。改进方法是将LED先串联后并联得到稳定电压,然而受到电压影响每个LED的电流不相等^[2]。LED的稳定性和寿命会因其在电流不相等的状态下工作而变得不稳定和缩短,所以为使LED稳定并长时间发光,需采用恒流源给LED供电。

研究者为实现多路LED恒流进行了大量的相关实验研究,提出的方法主要有有源恒流方法^[3]和无源恒流方法^[4]。有源恒流方法是通过控

制电路控制输出电流恒流的方法,而无源恒流方法则在电路结构中使用电阻、电容等线性无源器件,使LED恒流。无源恒流方法具有成本较低、结构简单的优点,被研究者大量研究^[5]。传统LED驱动电源采用Boost和Buck电路实现,相关研究较多。与传统电源相比,Cuk变换电路也是一种经典变换器,其输入电流和输出电流均连续,有利于滤波处理,但目前对该变换电路的研究相对较少。文献[6]在Cuk单级电路的基础上利用两个开关管相互复用的方法实现两路LED恒流,但该结构中开关管多。文献[7]是用传统Cuk电路的结构驱动LED。文献[8]的电路结构是由两个Cuk电路并联组成。文献[9]的电路结构是在单级Cuk电路的基础上增加一个开关管的形式,

作者简介:晏玉林(1996—),女,硕士研究生,Email:1947956286@qq.com

通讯作者:夏焰坤(1984—),男,博士,副教授,Email:yankunjtdx@163.com

但两者电路中都是多个开关管。文献[10]把Cuk电路和LLC谐振变换器结合成两级式LED驱动电路,但结构复杂且电路中存在变压器影响电路工作效率。

本文提出了一种基于两路Cuk改进电路的输出LED恒流源,对其电路结构、工作模式和恒流原理进行了分析,推导了其电压增益表达式、电感电流表达式和输入输出功率的表达式。该恒流源利用Cuk变换电路结构中的中间储能电容元件实现对两路LED输出支路的自动均流。最后搭建了功率为3 W的样机证明其理论。

1 工作原理分析

1.1 电路结构

图1为传统的Cuk变换电路图,主要元器件有输入直流电源 V_{in} 、电感 L_1 和 L_2 、电容 C_1 、开关管 S 、二极管 D 、输出电容 C_o 及负载。其工作模式会因电路中两个电感的工作模式不同而不同。

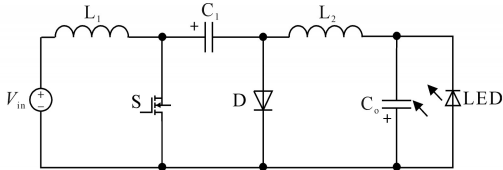


图1 传统Cuk变换电路

Fig.1 Traditional Cuk conversion circuit

本文提出的基于Cuk改进电路的两路恒流驱动电源,结构如图2所示,主要包括输入直流电源 V_{in} 、输入电感 L_1 、开关管 S 、恒流电容 C_1 、二极管 D_1 和 D_2 、输出电感 L_2 、输出电容 C_{o1} 和 C_{o2} 、两路LED负载以及采样电阻 R_s 。该电路结构中的电容 C_1 是恒流电容,通过电容 C_1 的电荷充放电平衡原理,实现两路LED自动恒流,因此只需控制一路LED的输出电流即可。

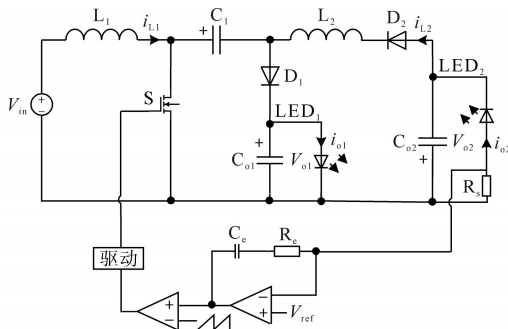


图2 基于Cuk改进电路的两路恒流驱动电源电路结构

Fig.2 Circuit structure of two constant current drive power supplies based on Cuk improved circuit

1.2 工作模式

为简化分析,假设:1)所有元件被认为是理

想器件;2)恒流电容 C_1 、输出电容 C_{o1} 和 C_{o2} 相当大,并且 C_{o1} 、 C_{o2} 相等;3)电感 L_1 的放电时间小于电感 L_2 的放电时间,且两个电感都工作在断续模式,即DCM(discontinuous conduction mode)模式。

该恒流源包含4个工作模式。图3所示为4个工作模式的具体等效分析电路图。

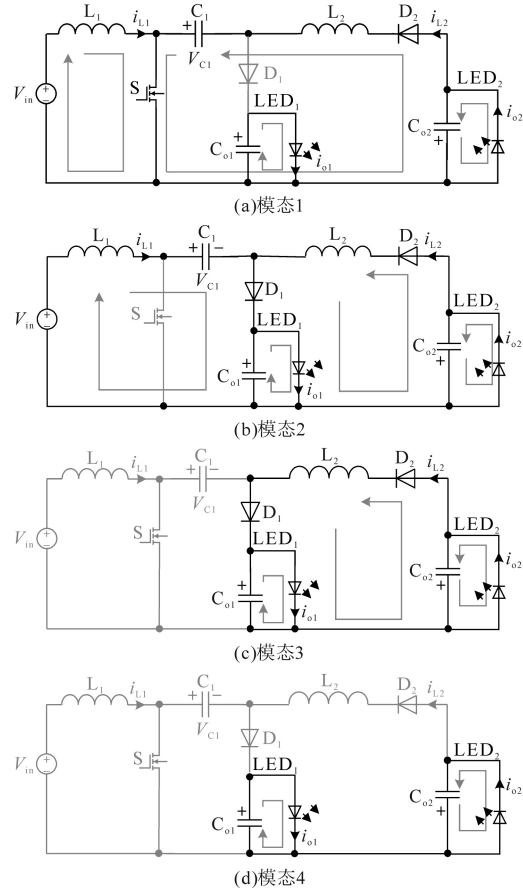


图3 各模式等效电路

Fig.3 Each modal equivalent circuit

具体的模式分析如下:

模式1[t_0-t_1]:如图3a所示,开关管 S 在 t_0 时处于导通状态,电源电压 V_{in} 给电感 L_1 充电。二极管 D_1 因两端分别接电容 C_1 的负极和正极而反向截止,所以电容 C_1 通过二极管 D_2 回路给电感 L_2 充电,向输出电容 C_{o2} 供电。电感电流 i_{L1} 、 i_{L2} 缓慢增加,电容 C_1 电流随之增加且方向与 i_{L2} 相反。此时有以下关系式:

$$\begin{cases} i_{L1(t)} = \frac{|V_{in}|}{L_1} (t - t_0) \\ i_{L2(t)} = \frac{V_{C1} - V_{o2}}{L_2} (t - t_0) \\ i_{C1} = -i_{L2(t)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{o2} 为第二路负载的输出电压。

在 t_1 时刻, i_{L1} 和 i_{L2} 最大,模式1工作结束。 L_1

和L₂的峰值电流计算如下:

$$\begin{cases} i_{L1-pk(t)} = \frac{|V_{in}|}{L_1} t_{on} \\ i_{L2-pk(t)} = \frac{V_{C1} - V_{o2}}{L_2} t_{on} \end{cases} \quad (2)$$

式中:t_{on}为开关管S处于导通状态的时间。

此模式下的维持时间为

$$\tau_1 = t_1 - t_0 = t_{on} \quad (3)$$

模式2[t₁—t₂]:如图3b所示,开关管S在t₁时处于断开状态,二极管D₁受正向压降处于导通状态。电感L₁和电感L₂开始放电,电感L₁通过电容C₁和二极管D₁向输出电容C_{o1}供电,此时i_{C1}与i_{L1}方向相同;电感L₂由二极管D₁,D₂回路向输出电容C_{o1},C_{o2}供电。该模式下i_{L1}和i_{L2}线性下降。此时有以下关系式:

$$\begin{cases} i_{L1(t)} = i_{L1(t_1)} + \frac{V_{in} - V_{C1} - V_{o1}}{L_1} (t - t_1) \\ i_{L2(t)} = i_{L2(t_1)} - \frac{V_{o1} + V_{o2}}{L_2} (t - t_1) \\ i_{C1} = i_{L1(t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中:V_{o1}为第一路负载的输出电压。

在t₂时刻,i_{L1}变为0,电感L₁在后面的工作模式不继续放电,模式2工作结束,此模式下的维持时间为

$$\tau_2 = t_2 - t_1 = i_{L1}(t_1)L_1/(V_{C1} + V_{o2} - V_{in}) \quad (5)$$

模式3[t₂—t₃]:如图3c所示,开关管S保持断开。电流i_{L2}由二极管D₁,D₂支路继续向负载供电。此时有以下关系式:

$$\begin{cases} i_{L1(t)} = 0 \\ i_{L2} = i_{L2(t_2)} - \frac{V_{o1} + V_{o2}}{L_2} (t - t_2) \end{cases} \quad (6)$$

在t₃时刻,i_{L2}减小到0,电感L₂在下一个工作模式中不继续放电。模式3工作结束。此模式下的维持时间为

$$\tau_3 = t_3 - t_2 = i_{L2}(t_2)L_2/(V_{o1} + V_{o2}) \quad (7)$$

模式4[t₃—t₄]:如图3d所示,开关管S依然断开。负载由输出电容C_{o1},C_{o2}供电。该模式下的持续时间为

$$\tau_4 = t_4 - t_3 = T - \tau_1 - \tau_2 - \tau_3 \quad (8)$$

式中:T为周期。

2 工作特性分析

2.1 恒流分析

由1.2节分析可知,在模式1电感L₁,L₂充电,

在模式2电感L₁放电,在模式2和模式3电感L₂放电,因此L₁放电时间比L₂放电时间短;在模式1中电容C₁处于放电状态,在模式2中电容C₁处于充电状态。因此可得该恒流源工作在稳态状态下的主要工作波形,如图4所示。图中,V_g为开关管S的栅极电压;t_{off1}为电流i_{L1}降低时间;t_{off2}为电流i_{L2}降低时间。

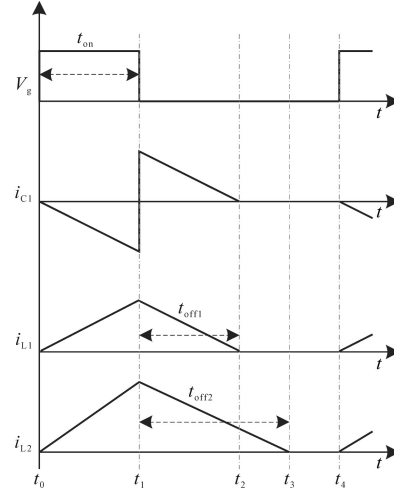


图4 稳态状态下的工作波形

Fig.4 Working waveforms in steady-state

由图4可知,在一个稳定周期内恒流电容C₁放电和充电时的电荷量分别为

$$\begin{cases} Q_{C1-f} = \int_{t_0}^{t_1} -i_{C1(t)} dt \\ Q_{C1-c} = \int_{t_1}^{t_2} i_{C1(t)} dt \end{cases} \quad (9)$$

式中:Q_{C1-f}为电容C₁的放电电荷量;Q_{C1-c}为电容C₁的充电电荷量。

由电容电荷守恒的原则可得:电容C₁在充、放电状态下的电荷量是相等的,则有以下关系:

$$Q_{C1-f} = Q_{C1-c} \quad (10)$$

由式(9)可知:

$$\left| \int_{t_0}^{t_1} -i_{C1(t)} dt \right| = \left| \int_{t_1}^{t_2} i_{C1(t)} dt \right| \quad (11)$$

在一个周期T_s内,输入电感L₁的放电量等于电容C₁充电量,输出电感L₂的充电量等于电容C₁放电量,则电感L₁的放电电流平均值和电感L₂的充电电流平均值可表示为

$$\begin{cases} i_{L1-F-av} = Q_{C1-c}/T_s \\ i_{L2-C-av} = Q_{C1-f}/T_s \end{cases} \quad (12)$$

由以上对恒流源的工作模式电路分析可知,在一个周期中有:

$$\begin{cases} i_{o1} = i_{L1-F-av} + i_{L2-F-av} \\ i_{o2} = i_{L2-C-av} + i_{L2-F-av} \end{cases} \quad (13)$$

式中:i_{o1},i_{o2}分别为两路负载的输出电流。

由式(12)、式(13)可得:

$$i_{o1} = i_{o2} \quad (14)$$

2.2 电压分析

开关管的控制采用定频控制,导通和断开时间一定,根据电感 L_1, L_2 的伏秒平衡原理可得:

$$\begin{cases} V_{in}t_{on} = (V_{C1} + V_{o1} - V_{in})t_{off1} \\ (V_{C1} - V_{o2})t_{on} = (V_{o1} + V_{o2})t_{off2} \end{cases} \quad (15)$$

该恒流源的电压增益与输出电压、输入电压之间的关系由式(15)可推出为

$$M = \frac{V_{o1} + V_{o2}}{V_{in}} = \frac{D(D + D_1)}{D_1(D + D_2)} \quad (16)$$

式中: D 为开关管S导通时在一个周期中所占比例; D_1 为开关管S断开时 i_{L1} 减小时间在一个周期所占比例; D_2 为一个周期中开关管S断开时 i_{L2} 的减小时间所占比例。

由式(16)可知,基于Cuk电路的两路恒流源的电压增益 M 通过调节占空比 D 的变化可以实现输出电压升压或降压的功能,可得到各路LED负载所需电压。

2.3 电流分析

在一个周期内,该恒流源的输入电感 L_1 的电流平均值为

$$\begin{aligned} i_{L1-av} &= i_{L1-pk}(t_{on} + t_{off1})/2t_s \\ &= \frac{V_{in}D^2T_s}{2L_1[1 - V_{in}/(V_{C1} + V_{o2})]} \end{aligned} \quad (17)$$

用 i_{L2-av} 表示输出电感 L_2 的电流平均值,与输出电流 i_{o2} 是相等关系,则有表达式为

$$i_{L2-av} = i_{o2} = \frac{V_{C1} - V_{o2}}{2L_2T_s}t_{on}(t_{on} + t_{off2}) \quad (18)$$

通过对恒流源的模态等效电路分析可知式(13)中电流关系式可表示为

$$\begin{cases} i_{L1-F-av} = V_{in}t_{on}t_{off1}/(2L_1T_s) \\ i_{L2-F-av} = (V_{C1} - V_{o2})t_{on}t_{off2}/(2L_2T_s) \end{cases} \quad (19)$$

2.4 功率分析

在稳态的工作周期内,一个周期内的电感 L_1 的平均电流与输入电流相等,则该恒流源的输入电流 i_{in} 表示为

$$i_{in} = i_{L1-av} = \frac{V_{in}t_{on}^2}{2T_sL_1(1 - \frac{V_{in}}{V_{C1} + V_{o2}})} \quad (20)$$

因此在一个周期内,该恒流源的输入功率 P_{in} 可表示为

$$P_{in} = V_{in}i_{in} = \frac{V_{in}^2t_{on}^2}{2T_sL_1[1 - V_{in}/(V_{C1} + V_{o2})]} \quad (21)$$

在一个周期中,输出功率可表示为

$$P_o = V_o i_o = V_{o1} i_{o1} + V_{o2} i_{o2} \quad (22)$$

3 实验验证

为验证该恒流源理论分析的可靠性,对提出的两路Cuk改进电路的恒流源搭建样机进行验证。样机模型如图5所示,该样机的参数为:直流输入24V,开关管频率25kHz,电感 $L_1=150\mu\text{H}$,电感 $L_2=150\mu\text{H}$,电容 $C_1=100\mu\text{F}$,电容 $C_{o1}=C_{o2}=47\mu\text{F}$,负载电压 $V_{o1}=5\text{V}, V_{o2}=7.5\text{V}$,负载电流 $I_{o1}=0.25\text{A}, I_{o2}=0.25\text{A}$,二极管型号FR107,开关管型号SN80C。

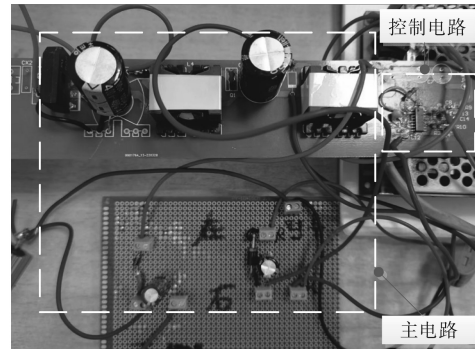


图5 样机模型

Fig.5 Prototype model

测得的波形如图6~图9所示。图6为电感 L_1, L_2 的电流波形图,可知电流 i_{L1} 和 i_{L2} 都是断续状态,且电感 L_1 的放电时间比电感 L_2 的放电时间短;图7为开关管S的栅极电压波形和电流 i_{L2} 的波形图;图8、图9分别为负载电压波形和负载电流波形,由于该驱动电源的负载采用不同阻值的电阻,则负载电压不等。从图9可知当负载不相等时负载电流相等,实现两路恒流功能,为0.25A。此外,该恒流源的两个输出电路实现降压,因此在24V直流输入的情况下该样机的效率最大时约为82%。

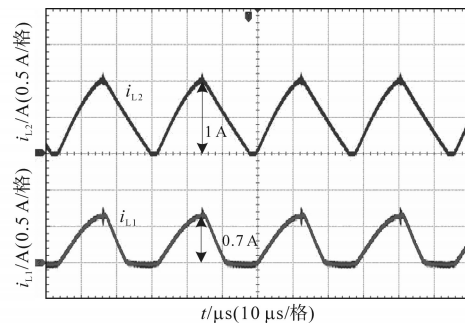


图6 电感 L_1, L_2 电流波形

Fig.6 Current waveforms of inductor L_1 and L_2