

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.205

中图分类号: TM46

文献标志码: A

# Z源谐振型单开关双通道LED驱动器

张 杰<sup>1,2</sup>, 邹 晨<sup>1</sup>(中国电源学会学生会员), 杨 淋<sup>1</sup>(中国电源学会学生会员),  
肖 辞<sup>1</sup>, 刘 林<sup>1</sup>, 高迎飞<sup>1</sup>

(1.湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068; 2.襄阳湖北工业大学产业研究院, 襄阳 441100)

**摘要:** 提出1种新型双通道发光二极管LED(light emitting diode)驱动器, 并详细分析了其工作原理和特点。所提驱动器使用1种新型Z源谐振网络和1个与电源共地的有源开关结构, 并利用平衡电容自动实现电流均衡, 因此其电流控制非常简单。同时由于利用Z源谐振网络传递能量, 该驱动器具有软开关、效率高、体积小、电压应力较低等优势。为验证所提驱动器的有效性, 研制了1台80W的实验样机进行测试。

**关键词:** LED驱动器; Z源谐振网络; 电容电荷平衡

## Z-source Resonant Single-switch Two-channel LED Driver

ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, ZOU Chen<sup>1</sup>, *Student Member, CPSS*, YANG Lin<sup>1</sup>, *Student Member, CPSS*,  
XIAO Ci<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, GAO Yingfei<sup>1</sup>

(1. Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Xiangyang Industrial Institute, Hubei University of Technology, Xiangyang 441100, China)

**Abstract:** A novel two-channel light emitting diode (LED) driver is proposed, and its operating principle and characteristics are analyzed in detail. This driver uses a novel Z-source resonant network and an active switch which has the same ground properties as the power supply, and the current balance is automatically realized by balancing capacitors, so its current control is simple. At the same time, owing to the use of Z-source resonant network to transfer energy, the proposed driver has advantages such as soft switching, high efficiency, small volume and low voltage stress. To verify the effectiveness of this driver, a 80 W prototype was built and tested.

**Keywords:** Light emitting diode (LED) driver; Z-source resonant network; capacitive charge balance

与传统照明相比, 发光二极管LED(light emitting diode)由于寿命长、效率高、环境友好、体积小等特点, 近几年发展迅速<sup>[1-2]</sup>。LED一般采用恒流控制, 而非恒压控制, 特别是在大功率场合, LED常采用串并联混联的方式。由于LED导通压降的

负温度系数及伏安特性的离散性, 每串LED之间的电流不平衡容易引起光衰, 加速LED老化, 甚至导致其烧毁。因此为了实现各支路的发光强度均衡及热效应一致, 研究多路输出LED均流方案具有重要意义<sup>[3]</sup>。

目前LED多通道输出均流技术主要可以分为有源均流和无源均流。有源均流分为线性模式和开关模式2种, 电路控制复杂且成本较高。无源均流使用电阻、电容、电感及变压器等无源器件实现各支路电流均衡。与有源均流技术相比, 无源均流技术特别是电容均流具有电路控制简单、体积小、精

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-27, 2022-05-06;  
录用日期: 2022-05-24; 网络首发日期: 2022-08-01  
基金项目: 2020年湖北省重点研发计划资助项目(2020BBB084)

This work is supported by Key Research and Development Program in Hubei Province in 2020 under the grant 2020BB084

度高的优势,因此近年来利用电容电荷平衡机制的多通道 LED 驱动器成为主流方案<sup>[4-5]</sup>。

文献[6-7]提出了若干使用电荷平衡机制的 220 V 交流输入、直流输出的多通道 LED 驱动器;文献[8]提出了 1 种非隔离型双通道 LED 驱动器,该驱动器使用 2 个有源开关,虽然其中 1 个开关管实现了零电压开通 ZVS(zero voltage switching),但是需要采用隔离驱动;文献[9]提出了 1 种不需要隔离驱动的非隔离型双通道 LED 驱动器,但是电路没有软开关特性;文献[10]提出了 1 种降压型双通道 LED 驱动器,但是为了保证每条 LED 输出支路上的电感电流连续,均需选取较大的支路电感,既会在效率的损失,也会造成尺寸和重量的增加。

文献[11]首先提出了 Z 源逆变器的结构,利用独特的 Z 源网络,克服了传统逆变器中的部分障碍,由于该无源网络的独特性,在文献[11]之后,Z 源网络和准 Z 源网络被广泛应用。文献[12]研究了准 Z 源网络在逆变器中的应用,文献[13-15]则研究了 Z 源网络和准 Z 源网络在 DC-DC 变换器中的应用,但是关于 Z 源网络和准 Z 源网络应用在 LED 驱动中的研究较少。文献[16]首次将准 Z 源网络应用在双通道 LED 驱动器中,利用准 Z 源网络和 1 个有源开关实现 2 串 LED 电流的平衡。但该电路在输出支路中为了保证电流单向流动,电感尺寸较大,同时也存在半导体器件电压应力较高和效率不高的问题。针对上述问题,本文提出了 1 种 Z 源谐振型单开关双通道 LED 驱动器。

## 1 工作原理分析

图 1 为 Z 源 DC-DC 变换器中的传统 Z 源网络。由于传统 Z 源网络中电容  $C_1$ 、 $C_2$  电荷平衡的特性,电感  $L_1$ 、 $L_2$  支路上的电流会自动平衡。本文在传统 Z 源网络上进行推演,提出了 Z 源谐振型单开关双通道 LED 驱动器,如图 2 所示。该 LED 驱动器由输入电感  $L_m$ 、开关管  $S_1$  和后续 Z 源谐振网络组成。该电路仅有 1 个有源开关,并与有源开关共地,因此无需光耦隔离即可实现 MOSFET 的栅极驱动。

为简化分析,进行如下假设:①所有开关管、二极管、电容器、电感器均为理想器件;②输出滤波电容  $C_{o1}$ 、 $C_{o2}$  足够大,则输出电压  $V_{LED1}$  和  $V_{LED2}$  可视为恒定值;③平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  上的电压纹波较小,则平衡电容两端的电压  $V_{C1}$  和  $V_{C2}$  可近似视为恒定值;④输入电感  $L_m$  远大于谐振电感  $L_1$ 、 $L_2$ ,输入电感  $L_m$  的电流工作在电流连续模式 CCM(continuous current mode)下,谐振电感  $L_1$ 、 $L_2$  的电流工作在电流断续模式 DCM(discontinuous current mode)下,谐振电感  $L_1$ 、 $L_2$  足够小,其两端电压可以近似忽略;⑤平衡电容值相等,谐振电感值相等,滤波电容值相等,即  $C_1 = C_2$ ,  $L_1 = L_2$ ,  $C_{o1} = C_{o2}$ ;⑥开关频率取  $f_s$ ,开关周期为  $T_s$ ,谐振频率取  $f_r$ ,谐振周期为  $T_r$ ,开关  $S_1$  导通的占空比为  $D$ 。因此该 LED 驱动器存在 3 种工作模态,各模态的等效电路如图 3 所示,稳态时 LED 驱动器的主要波形如图 4 所示。

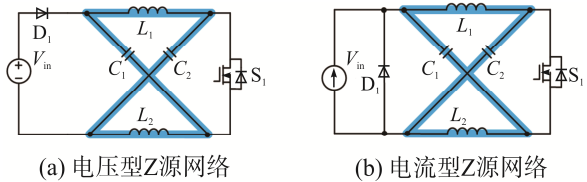


图 1 Z 源 DC-DC 变换器中的传统 Z 源网络  
Fig. 1 Traditional Z-source network in Z-source DC-DC converter

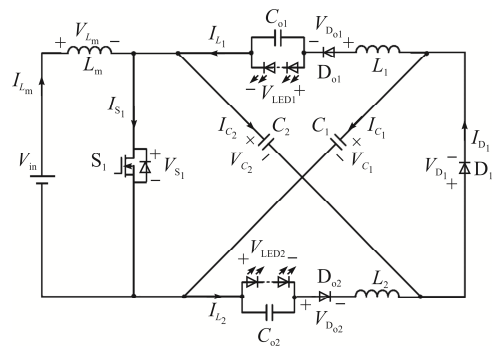


图 2 Z 源谐振型单开关双通道 LED 驱动器  
Fig. 2 Z-source resonant single-switch two-channel LED driver

模态 1 [ $t_1, t_2$ ]: 如图 3(a)所示,开关  $S_1$  导通,  $L_m$  储能,  $I_{L_m}$  线性上升,平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  释放能量。二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  承受正向电压导通,  $L_1$  与  $C_1$  发生串联谐振,  $L_2$  与  $C_2$  发生串联谐振,直到谐振电感电

流  $I_{L_1}$ 、 $I_{L_2}$  减小至 0, 进入模式 2。

模式 2 [ $t_2, t_3$ ]: 如图 3(b)所示, 开关  $S_1$  继续导通,  $L_m$  继续储能,  $I_{L_m}$  继续线性上升, LED 负载分别由单独的滤波电容供电, 直至开关  $S_1$  断开, 同时二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  承受反向电压零电流关断, 进入模式 3。

模式 3 [ $t_3, t_4$ ]: 如图 3(c)所示, 开关  $S_1$  断开, 二极管  $D_1$  承受正向电压导通,  $I_{L_m}$  线性下降, 电感  $L_m$  释放能量, 电容  $C_1$ 、 $C_2$  充电, LED 负载分别由单独的滤波电容供电, 直至开关  $S_1$  导通, 开始下一个周期。

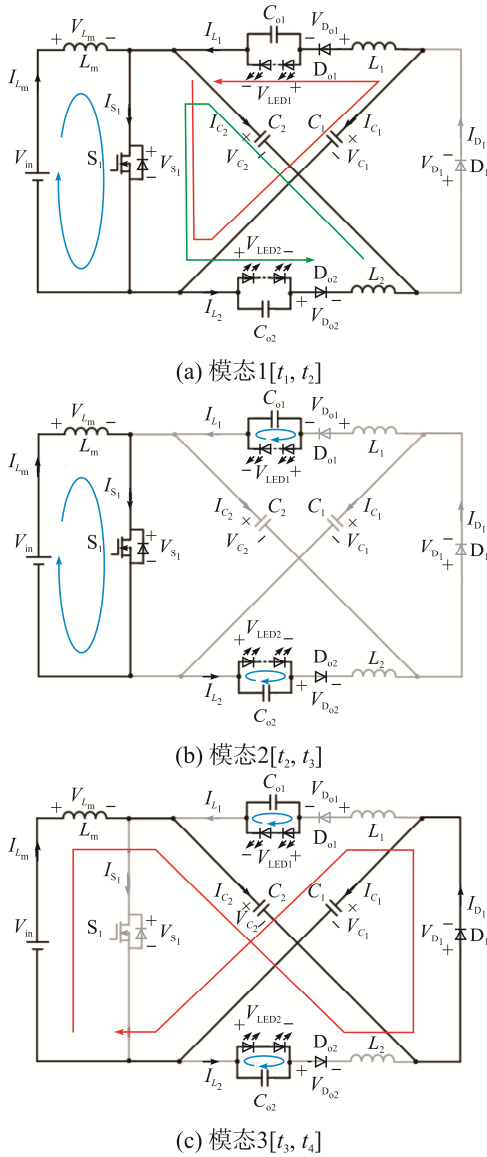


图 3 驱动器各模式的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuits of proposed driver in different modes

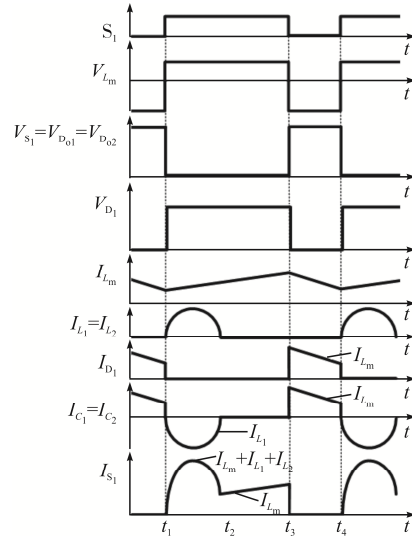


图 4 驱动器主要波形

Fig. 4 Key waveforms of proposed driver

## 2 电路特性分析

### 2.1 电压增益分析

由于电路中平衡电容电压纹波较小,  $V_{C_1}$ 、 $V_{C_2}$  可近似看作恒定值, 根据模式 1 推导出输出电压  $V_{LED1}$  和  $V_{LED2}$  的表达式为

$$\begin{cases} V_{C_1} = V_{LED1} \\ V_{C_2} = V_{LED2} \end{cases} \quad (1)$$

根据模式 1 和模式 3, 可以推导出输入电感  $L_m$  两端的电压  $V_{L_m}$  的表达式为

$$V_{L_m} = \begin{cases} V_{in} & 0 < t < DT_s \\ V_{in} - V_{C_1} - V_{C_2} & DT_s < t < T_s \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $V_{in}$  为输入电压。

根据式(2), 在 1 个开关周期内结合电感  $L_m$  的磁通平衡特性, 可以得到输入电感  $L_m$  的伏秒平衡公式为

$$V_{in}DT_s = (V_{C_1} + V_{C_2} - V_{in})(1 - D)T_s \quad (3)$$

结合式(1)和式(3), 可得电压增益公式为

$$\frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

### 2.2 电流平衡机制

所提驱动器输出电流的平衡是依靠 Z 源谐振

网络中平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电荷平衡原理自动实现的。在模式 1 中, 开关  $S_1$  导通, 电容  $C_1$  给 LED1 支路放电, 电容  $C_2$  给 LED2 支路放电, 则可以推导出 LED1 和 LED2 的平均电流为

$$\begin{cases} I_{\text{LED1}} = \frac{Q_{C_1\text{dis}}}{T_s} \\ I_{\text{LED2}} = \frac{Q_{C_2\text{dis}}}{T_s} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $I_{\text{LED1}}$ 、 $I_{\text{LED2}}$  分别为流过 LED1、LED2 的平均电流;  $Q_{C_1\text{dis}}$ 、 $Q_{C_2\text{dis}}$  分别为电容器  $C_1$ 、 $C_2$  在 1 个开关周期内的放电电荷量。

在模式 3 中, 开关  $S_1$  关闭, 电容  $C_1$  和  $C_2$  被充电, 可以得到

$$Q_{C_1\text{ch}} = Q_{C_2\text{ch}} = I_{\text{ch}}(1-D)T_s \quad (6)$$

式中,  $Q_{C_1\text{ch}}$ 、 $Q_{C_2\text{ch}}$  分别为  $C_1$ 、 $C_2$  的充电电荷量;  $I_{\text{ch}}$  为  $C_1$  和  $C_2$  的充电电流。

同时, 结合电容  $C_1$  和  $C_2$  在 1 个开关周期内的电荷平衡特性, 推导出

$$\begin{cases} Q_{C_1\text{ch}} = Q_{C_1\text{dis}} \\ Q_{C_2\text{ch}} = Q_{C_2\text{dis}} \end{cases} \quad (7)$$

将式(5)~式(7)合并得到电流平衡方程可得

$$I_{\text{LED1}} = I_{\text{LED2}} \quad (8)$$

### 2.3 半导体器件应力分析

当开关  $S_1$  导通时, 根据基尔霍夫电压定律 KVL (Kirchhoff's voltage law), 可以得到二极管  $D_1$  承受的最大反向电压  $V_{D_1}$  为

$$V_{D_1} = V_{C_1} + V_{\text{LED2}} = V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}} \quad (9)$$

当开关管  $S_1$  关断时, 根据 KVL, 可以得到开关管  $S_1$  和二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  承受的最大反向电压分别为

$$\begin{cases} V_{D_{o1}} = V_{\text{LED1}} + V_{C_2} = V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}} \\ V_{S_1} = V_{C_1} + V_{C_2} = V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}} \\ V_{D_{o2}} = V_{\text{LED2}} + V_{C_1} = V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $V_{S_1}$ 、 $V_{D_{o1}}$ 、 $V_{D_{o2}}$  分别为  $S_1$ 、 $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  承受的最大反向电压。

同理, 根据不同模式时的基尔霍夫电流定律

KCL(Kirchhoff's current law), 可以得到半导体器件承受的电流应力为

$$\begin{cases} I_{S_1} = I_{L_m} + I_{L_1} + I_{L_2} \\ I_{D_1} = I_{L_m} \\ I_{D_{o1}} = I_{L_1} \\ I_{D_{o2}} = I_{L_2} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $I_{L_m}$ 、 $I_{L_1}$ 、 $I_{L_2}$  分别为流过电感  $L_m$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  的电流;  $I_{S_1}$ 、 $I_{D_1}$ 、 $I_{D_{o1}}$ 、 $I_{D_{o2}}$  分别为流过  $S_1$ 、 $D_1$ 、 $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  的电流。可见, 驱动器中所有半导体器件的电压应力一致, 始终等于输出电压, 即  $V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}}$ , 半导体器件的电流应力则取决于电感电流。

### 2.4 关键设计思路

为保证输入电感  $L_m$  工作在 CCM, 根据能量守恒定律, 可以推导出

$$I_{L_m\text{min}} = \frac{(V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}})I_{\text{LED1}}}{V_{\text{in}}} - \frac{V_{\text{in}}}{2L_m}DT_s > 0 \quad (12)$$

式中,  $I_{L_m\text{min}}$  为输入电感电流的最小值。

根据式(4)和式(12), 可以得到电感  $L_m$  的临界值, 电感  $L_m$  的选择条件为

$$L_m > \frac{V_{\text{in}}^2(V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}} - V_{\text{in}})T_s}{2(V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}})^2 I_{\text{LED1}}} \quad (13)$$

在设计时, 由于二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  的零电流关断可以大大提高电路的整体效率, 因此应尽量保证电路的零条件状态。若不满足零条件, 电路将不能实现完全谐振。谐振频率与谐振参数的关系可表示为

$$f_r = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (14)$$

零电流关断 ZCS(zero current switching)的零条件状态可表示为

$$DT_s > \frac{T_r}{2} \quad (15)$$

结合式(14)和式(15)可以得到推荐的谐振电感和平衡电容的取值范围, 即

$$L_1 C_1 = C_2 L_2 < \left(1 - \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{LED1}} + V_{\text{LED2}}}\right)^2 T_s^2 / \pi^2 \quad (16)$$

同时, 平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压纹波不应取太大, 电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压纹波公式为

$$\Delta V_{C_1} = \frac{I_{LED1} T_s}{C_1} = \Delta V_{C_2} = \frac{I_{LED2} T_s}{C_2} \quad (17)$$

式中,  $\Delta V_{C_1}$ 、 $\Delta V_{C_2}$  分别为电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压纹波。

由式(17)可知, 平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  越大, 越可以有效减小电容两端的电压纹波, 但是  $C_1$ 、 $C_2$  取值过大会增加 LED 驱动器的体积, 因此取值应适中。在实际选取谐振电感  $L_1$ 、 $L_2$  及平衡电容  $C_1$ 、 $C_2$  的参数时, 应综合考虑式(16)和式(17)。

### 3 实验验证及方案对比

为验证上述理论分析的正确性和可行性, 搭建了1台额定功率 80 W、输入电压范围为 70~190 V 的 LED 驱动器实验样机。为验证极端不平衡负载条件下驱动器的电流平衡特性, 输出端 LED1 和 LED2 的灯珠数量分别取 33 个和 49 个。主要实验参数见表 1, 图 5~图 8 为当输入电压  $V_{in}=100$  V 时的实验关键波形。

表 1 实验样机的电路参数

Tab. 1 Circuit parameters of prototype

参数	数值或型号
输入电感 $L_m$ /mH	2
谐振电感 $L_1$ 、 $L_2$ / $\mu$ H	2.2
平衡电容 $C_1$ 、 $C_2$ / $\mu$ F	2
开关频率 $f_s$ /kHz	50
滤波电容 $C_{o1}$ 、 $C_{o2}$ / $\mu$ F	100
输出负载 LED1、LED2/个	33、49
输出电流 $I_{LED1}$ 、 $I_{LED2}$ /mA	300
开关管 $S_1$	FCH110N65F
二极管 $D_1$ 、 $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$	C3D03060A

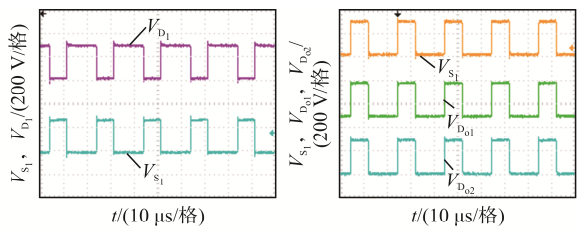


图 5 实验关键波形 1

Fig. 5 Key experimental waveforms (part 1)

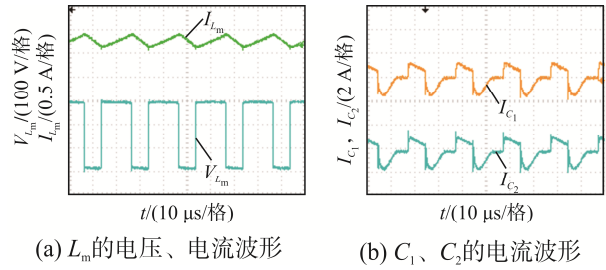


图 6 实验关键波形 2

Fig. 6 Key experimental waveforms (part 2)

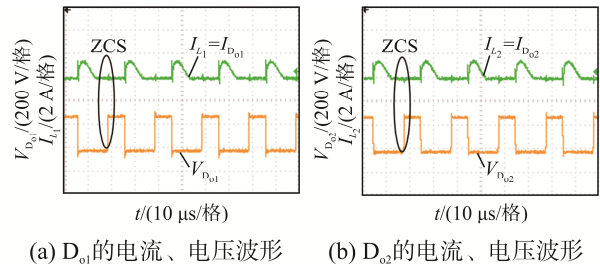


图 7 实验关键波形 3

Fig. 7 Key experimental waveforms (part 3)

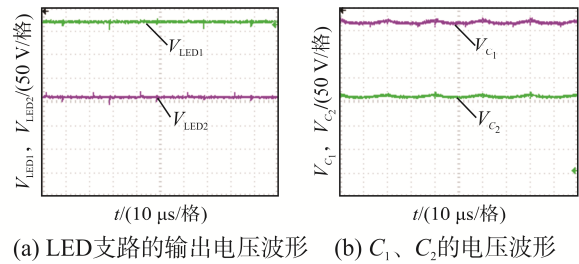


图 8 实验关键波形 4

Fig. 8 Key experimental waveforms (part 4)

为验证 LED 驱动器的电流均衡和恒流效果, 图 9 给出了输入电压分别为 100 V 和 160 V 时的输出电流波形。

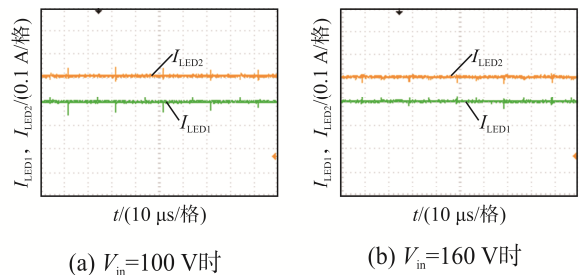


图 9 输出电流波形

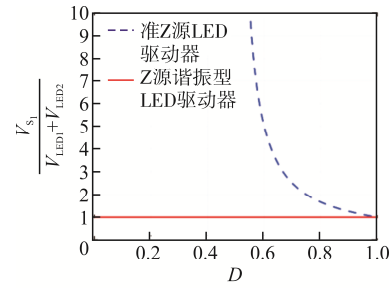
Fig. 9 Waveforms of output current

图 5 中开关管  $S_1$  与二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  导通时序相同、二极管  $D_1$  则与  $S_1$  导通时序相反, 且电压应力也与理论分析一致。图 6(a)中输入电感电流连续,

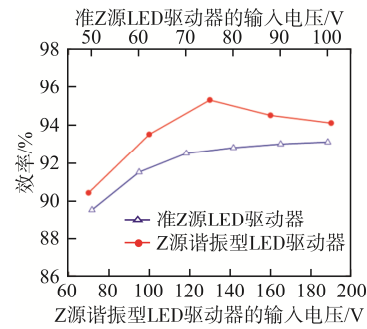
电感两端的电压也与理论分析一致,由图 6(b)可见,  $I_{C_1}$ 、 $I_{C_2}$  波形与理论分析一致。由图 7 可见, 谐振电感  $L_1$ 、 $L_2$  的谐振电流波形, 仅需保证谐振时间小于开关导通时间, 即式(15), 二极管  $D_{o1}$ 、 $D_{o2}$  即可实现 ZCS。由图 8 可见, 平衡电容电压  $V_{C_1}$ 、 $V_{C_2}$  分别等于 2 个输出电压  $V_{LED1}$ 、 $V_{LED2}$ , 而  $V_{LED1}$  与  $V_{LED2}$  之间 50 V 的差距是由于输出负载不平衡的 LED 数量导致的。由图 9 可见, 不同输入电压条件下 2 串 LED 输出电流为 300 mA, 在极端不平衡负载条件下依旧具有良好的输出电流均衡特性。

表 2 为 Z 源谐振型双通道 LED 驱动器与其他文献中的非隔离型直流输入双通道 LED 驱动器方案的主要性能对比。图 10 为文献[16]中的准 Z 源 LED 驱动器和本文所提 Z 源谐振型 LED 驱动器的半导体器件电压应力和效率对比。2 台实验样机均工作在 80 W 功率等级和 50 kHz 的开关频率条件下。由图 10(a)可见: 文献[16]中的准 Z 源 LED 驱动器, 随着占空比越来越远离 1, 开关管和二极管应力相对于单倍的输出电压成指数型的倍数增长; 本文的 Z 源谐振型 LED 驱动器无论占空比如何变化, 开关管和二极管电压应力始终等于输出电压, 在全范围内具有更小的电压应力。由图 10(b)可见: 由于本文所提驱动器实现了 ZCS 和 2 个电感、电容之间的串联谐振, 减小了无功环流, 且电感的减小意味着更小的等效直流阻抗, 因此具有更高的效率;

文献[16]实验样机额定输出电压 178 V, 由于电压应力问题, 输入电压仅能工作在 50~100 V, 在工作范围内效率为 89.5%~93.1%; 本文实验样机额定输出电压 267 V, 其效率在较宽的输入电压范围内 (70~190 V) 高达 90.4%~95.3%, 且在输入电压 110~190 V 时效率最佳, 均高于 94.0%。



(a) 电压应力对比



(b) 效率曲线对比

图 10 Z 源谐振型 LED 驱动器和准 Z 源 LED 驱动器的对比

Fig. 10 Comparison between Z-source resonant LED driver and quasi-Z-source LED driver

表 2 双通道 LED 驱动方案对比

Tab. 2 Comparison among schemes for two-channel LED driver

变量	文献[9]	文献[10]	文献[16]	本文
输出通道数	2	2	2	2
开关管数量	2	2	1	1
二极管数量	2	2	1	3
软开关情况	无	无	无	2ZCS
开关管电压应力	$\frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{2}$	$\frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{D}, \frac{V_{LED1}}{D}$	$\frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{2D-1}$	$V_{LED1} + V_{LED2}$
二极管电压应力	$V_{LED1} + V_{LED2}, \frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{2}$	$\frac{V_{LED1}}{D}, \frac{V_{LED2}}{D}$	$\frac{V_{LED1} + V_{LED2}}{2D-1}$	$V_{LED1} + V_{LED2}$
电压增益	$\frac{2}{1-D} (0.5 < D < 1.0)$	$D (0 < D < 0.5)$	$\frac{2D-1}{1-D} (0.5 < D < 1.0)$	$\frac{1}{1-D} (0 < D < 1.0)$
功率等级、开关频率	24 W、100 kHz	25 W、50 kHz	80 W、50 kHz	80 W、50 kHz
磁性元件大小	212 $\mu$ H $\times$ 2	10 mH $\times$ 2	2 mH, 11 mH $\times$ 2	2 mH, 2.2 $\mu$ H $\times$ 2
效率	接近 91.7%	最高 96.1%	89.5%~93.1%	90.4%~95.3%

根据表2和图10综合比较可知:本文所提LED驱动器相比于文献[9-10]中的LED驱动器具有更少的开关管数量;相比于文献[16]中的准Z源LED驱动器,本方案具有更低的半导体器件电压应力,更高的效率,更小的磁性元件尺寸和重量,虽然本文所提驱动器二极管数量不占优势,但是实现了零电流关断,减小了开关损耗。

## 4 结语

本文提出了1种Z源谐振型双通道LED驱动器,利用新型Z源谐振网络既平衡了2条输出支路的电流,也产生了2条串联谐振回路,驱动器中仅使用1个有源开关,驱动简单。本文对所提驱动器的工作原理和特性进行了详细分析,给出了关键设计思路并搭建了1台80W的实验样机,验证了该方案的正确性与可行性。并与近几年的非隔离型直流输入双通道LED驱动器进行了对比,分析了不同方案之间的特性和性能。基于上述分析与研究,所提LED驱动器为大功率LED驱动的电流平衡问题提供了1种切实可行的有效方案。

### 参考文献:

- [1] Narendran N, Gu Y. Life of LED-based white light sources [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(1): 167-171.
- [2] 林国庆, 黄远彬. 两开关无电解电容LED驱动电路拓扑及控制策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(18): 5742-5754.  
Lin Guoqing, Huang Yuanbin. Two-switch electrolytic capacitor-less LED driving circuit topology and control strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(18): 5742-5754. (in Chinese)
- [3] Carraro G. Solving high-voltage off-line HB-LED constant current control-circuit issues [C]// APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim, CA, USA, 2007: 1316-1318.
- [4] Zhang Ruihong, Chung H S H. Use of daisy-chained transformers for current-balancing multiple LED strings [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(3): 1418-1433.
- [5] Wu Xinke, Zhang Junming, Qian Zhaoming. A simple two-channel LED driver with automatic precise current sharing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4783-4788.
- [6] Liu Xueshan, Yang Qi, Zhou Qun, et al. Single-stage single-switch four-output resonant LED driver with high power factor and passive current balancing [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(6): 4566-4576.
- [7] 万宇阳, 刘雪山, 周群, 等. 整合式单开关两路恒流输出LED驱动电源[J]. *电源学报*, 2022, 20(1): 105-111.  
Wan Yuyang, Liu Xueshan, Zhou Qun, et al. Integrated single-switch dual-string LED driver with constant current output [J]. *Journal of Power Supply*, 2022, 20(1): 105-111. (in Chinese)
- [8] Hwu K I, Jiang W Z. Nonisolated two-channel LED driver with automatic current balance and zero-voltage switching [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(12): 8359-8370.
- [9] Hwu K I, Jiang W Z. Nonisolated two-phase interleaved LED driver with capacitive current sharing [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(3): 2295-2306.
- [10] Do D T, Cha H, Nguyen B L H, et al. Two-channel interleaved Buck LED driver using current-balancing capacitor [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(3): 1306-1313.
- [11] Peng Fang Zheng. Z-source inverter [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(2): 504-510.
- [12] Ge Baoming, Liu Yushan, Abu-Rub H, et al. State-of-charge balancing control for a battery-energy-stored quasi-Z-source cascaded-multilevel-inverter-based photovoltaic power system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(3): 2268-2279.
- [13] 丘恒越, 张桂东, 陈思哲. 基于准Z源的低电容电压

应力高增益 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 1-12.

Qiu Hengyue, Zhang Guidong, Chen Sizhe. High-gain DC-DC converter with low voltage stress of capacitor based on quasi-Z-source [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 1-12. (in Chinese)

- [14] Cao Dong, Peng F Z. A family of Z-source and quasi-Z-source DC-DC converters [C]// 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Washington, DC, USA, 2009: 1097-1101.
- [15] Torkan A, Ehsani M. A novel nonisolated Z-source DC-DC converter for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4574-4583.
- [16] Hong D, Cha H. LED current balancing scheme using current-fed quasi-Z-source converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14187-14194.



张杰

#### 作者简介:

张杰(1972— ), 男, 博士, 副教授。研究方向: 电力电子在智能微电网中的应用、高功率密度 DC-DC 变换器。E-mail: 274870985@qq.com。

邹晨(1997— ), 男, 中国电源学会学生会员, 通信作者, 硕士。研究方向: 高效率 DC-DC 变换器。E-mail: 1173383794@qq.com。

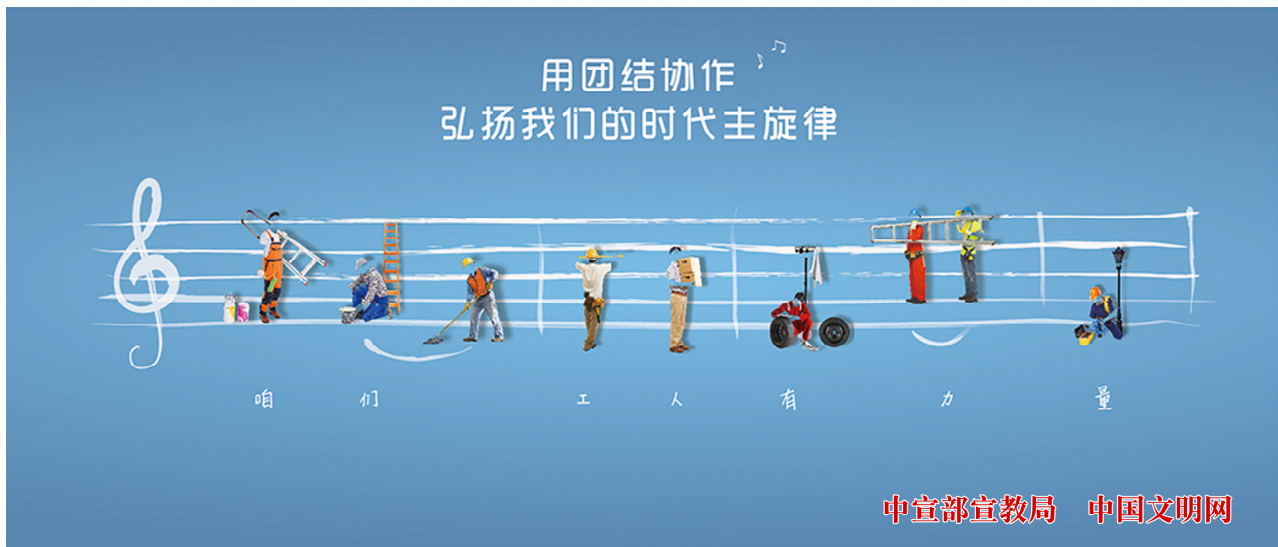
杨淋(1997— ), 男, 中国电源学会学生会员, 硕士。研究方向: 电力电子与电力传动。E-mail: 16671098679@163.com。

肖辞(1998— ), 女, 硕士。研究方向: 电力电子与电力传动。E-mail: 865384542@qq.com。

刘林(1997— ), 男, 硕士。研究方向: 储能变流器。E-mail: 47286834@qq.com。

高迎飞(1996— ), 女, 硕士。研究方向: 储能变流器。E-mail: 1979630676@qq.com。

(责任编辑: 耿越)



来源: 中国文明网