

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.020

基于后级调整的多路独立可控恒流 输出 LED 反激式驱动电源*

王 睿, 王金华, 张军明*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对 RGB 混光 LED 照明系统需要多个驱动电源分别驱动且系统复杂、成本较高的问题,提出了一种基于后级调整的多路独立可控恒流输出 LED 反激式驱动电源,在副边各路加入了 MOSFET,以控制各路分时导通,实现了多路输出电流的独立可控,详细分析了所提驱动电源的系统结构和工作原理,并进行了系统拓展。研究表明,该驱动电源不仅实现了多路输出电流的独立控制,而且不受负载电压、变压器匝比的影响,与传统混光驱动方案相比,能有效简化系统、降低成本,具有较高的实用价值。

关键词:反激;后级调整;LED 驱动;多路输出

中图分类号:TM13

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0101-05

Flyback multi-outputs LED driver with individual controllability based on secondary side post regulation

WANG Rui, WANG Jin-hua, ZHANG Jun-ming

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at simplifying the complex and costly RGB LED lighting system which requires multiple LED drivers, an individually controllable multi-outputs LED driver based on secondary side post regulation (SSPR) was proposed. The proposed LED driver was based on multi-outputs flyback converter with additional secondary side MOSFETs. The time-sharing multiplexing control was applied to make each output current individually controllable. The system configuration, operation principle and system development were analyzed in detail. A prototype was designed to verify the theoretical analysis. The results indicate that the proposed LED driver can output multiple individually controllable currents and get no influence from the load voltage and the transformer turns ratio.

Key words: flyback; secondary side post regulation (SSPR); LED driver; multiple output

0 引 言

随着 LED 技术的不断发展,LED 照明在效率、寿命、环保等方面展现出优于传统照明的特性,因而被广泛应用于民用及商业照明^[1]。然而,受封装及散热技术的限制,市场上大部分单颗 LED 的功率为 1 W ~ 3 W^[2],因此,大部分的照明场合需要同时使用多个 LED 光源串并联,以实现照明强度的要求。目前,多 LED 支路并联驱动技术仍是研究热点之一^[3]。

与此同时,随着智能照明技术的进一步发展,人们

对光源的色温提出了要求。为了调节 LED 光源色温,常采用 RGB 混光技术,即通过叠加红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)三路光源,并分别调节三路光源的强弱以得到不同的色温效果^[4-5]。为驱动 RGB 三路 LED,目前主流方法是每条 LED 支路电流均采用独立的恒流驱动器来控制。该方法能保证每路 LED 电流独立可控,但结构较复杂,需要多个驱动电路,不仅增加了系统成本,还降低了系统效率。

因此,为简化系统结构、降低成本,同时实现各支路输出电流独立可控,本研究提出一种基于后级调整

收稿日期:2015-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477154);浙江省自然科学基金资助项目(LY14E070005)

作者简介:王 睿(1991-),男,湖北武汉人,主要从事高效率开关电源、LED 驱动等方面的研究。E-mail:raywang@zju.edu.cn

通信联系人:张军明,男,教授,博士生导师。E-mail:zhangjm@zju.edu.com

(SSPR)^[6-8]的多路恒流输出 LED 驱动电源。该电源仅采用一个反激变流器来驱动多路 LED,各输出支路通过各自的电流反馈调节器实现恒流输出,互相独立,不存在耦合情况。笔者所提出的驱动电源具有结构简单、成本较低的优势,适用于多路并联高强度和 RGB 色彩模式下,需要独立控制多路输出电流等照明场合。

1 驱动电源系统结构及原理分析

1.1 驱动电源基本系统结构

基于后级调整技术的两路反激恒流变流器电路拓扑如图 1 所示。

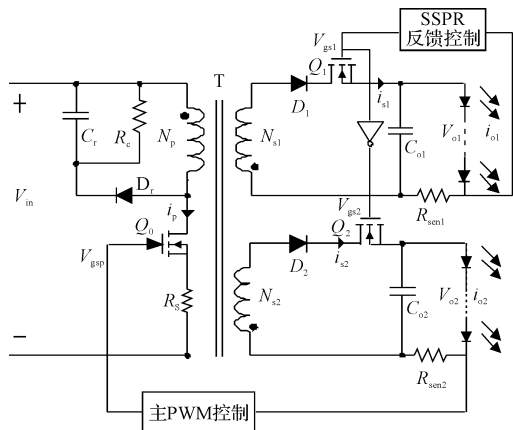


图 1 基于后级调整技术的两路反激恒流变流器

该变流器在两路反激变流器拓扑的基础上,在两路

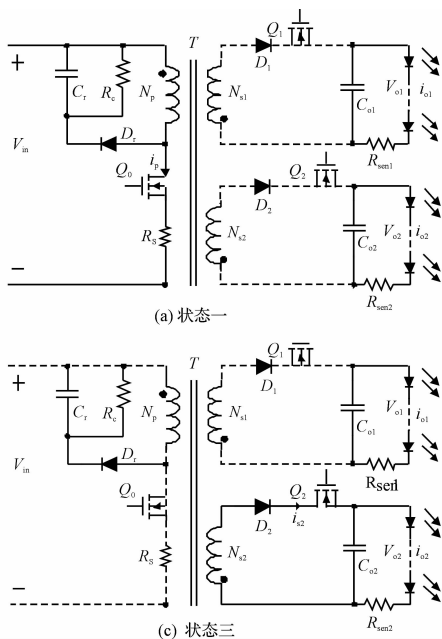


图 3 不同状态下变流器的等效电路

(1) 状态一。如图 3(a) 所示,原边开关管 Q_0 导通,不论副边开关管 Q_1 与 Q_2 的开关状态如何,续流二极管 D_1 与 D_2 都会截止。原边电流 I_p 线性上升。LED 负载由输出滤波电容供电。

副边分别增加了开关管 Q_1 与 Q_2 。为了保证两路输出独立可控,需要避免在原边开关关断后两路副边出现同时导通的情况,因此,要确保 Q_1 与 Q_2 不会同时开通。

驱动电源的两路输出电流分别由各自的反馈控制电路调节。如图 1 所示,第一路输出应用了后级调整技术,在副边通过控制开关管 Q_1 的通断来控制第一路输出电流的大小。第二路输出则由主 PWM 控制,通过控制原边开关管 Q_0 的通断来控制第二路输出电流的大小。

1.2 工作原理分析

该变流器在 DCM 与 CCM 状态下的工作波形分别如图 2(a,b) 所示。根据开关状态的不同,变流器可分为 4 个工作状态,其等效电路图如图 3 所示。

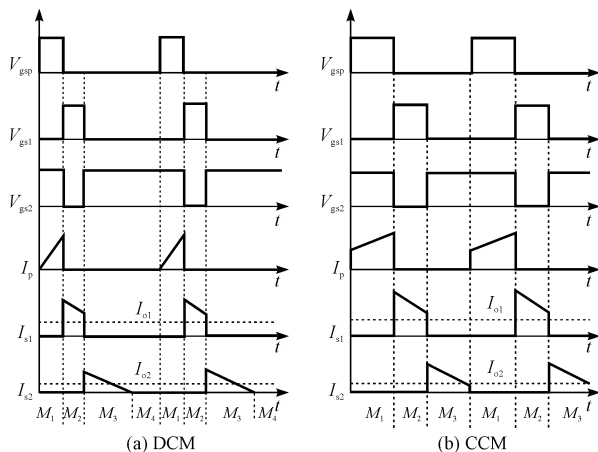
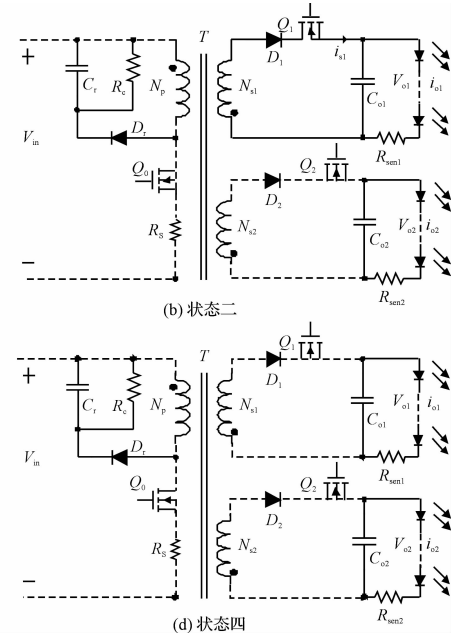


图 2 变流器稳态工作波形



(2) 状态二。如图 3(b) 所示,原边开关管 Q_0 关断,副边开关 Q_1 导通, Q_2 关断。续流二极管 D_1 导通, D_2 截止。励磁电感上的能量由变压器传输到第一路输出。副边电流 I_{s1} 线性下降,直至副边开关管 Q_1 关断。

(3) 状态三。如图 3(c) 所示,原边开关管 Q_0 关断,副边开关 Q_2 导通, Q_1 关断。续流二极管 D_2 导通, D_1 截止。励磁电感上的能量由变压器传输到第二路输出。副边电流 I_{s2} 线性下降。若变流器工作于 CCM 状态,则 I_{s2} 在下降到零之前,原边开关管 Q_0 导通,重新进入状态一。若变流器工作于 DCM 状态,则 I_{s2} 在 Q_0 导通之前下降至零。

(4) 状态四。如图 3(d) 所示,该状态只会在 DCM 模式下出现。原边开关管 Q_0 关断,续流二极管 D_1 与 D_2 都已截止。副边电流 I_{s1} 与 I_{s2} 都为零。LED 负载由输出滤波电容供电。

为了更好地说明变流器多路电流独立控制的原理,现给出变流器关键电流波形如图 4 所示。

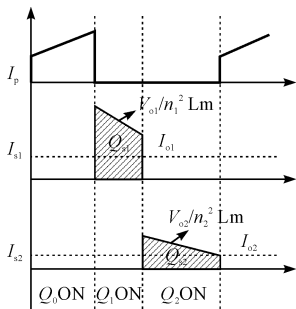


图 4 变流器关键电流波形

当变流器的原边开关 Q_0 导通时,原边电流 I_p 线性上升,励磁电感储存能量。当 Q_0 关断后,储存在励磁电感里的能量通过绕组 N_{s1} 与 N_{s2} 传递到副边。由于副边开关管 Q_1 与 Q_2 互补导通,因此储存在励磁电感里的能量会分时段地传递到两条支路。

若输出电容 C_{o1} 与 C_{o2} 足够大,可认为副边电流的交流纹波完全被输出电容吸收,输出电流 I_{o1} 与 I_{o2} 仅包含直流分量,其大小可表示为:

$$I_{o1} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{s1}(t) dt = \frac{Q_{s1}}{T} \quad (1)$$

$$I_{o2} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{s2}(t) dt = \frac{Q_{s2}}{T} \quad (2)$$

式中: T —开关周期; Q_{s1} , Q_{s2} — i_{s1} 与 i_{s2} 在一个开关周期内对时间的积分,即图 4 中所示阴影部分面积。

由图 4 可以看出, Q_{s1} 与 Q_{s2} 不存在耦合关系,因此 I_{o1} 与 I_{o2} 也不存在耦合关系。以 I_{o1} 与 I_{o2} 为控制量,分别进行闭环控制,那么就可以实现输出电流 I_{o1} 与 I_{o2} 的独立控制。

由图 4 可知,输出电压与副边电流下降的斜率大小呈正相关。在这里,输出电压 V_{o1} 与 V_{o2} 并不相等,故 i_{s1} 与 i_{s2} 下降的斜率大小不同。但是,由于受控对象 I_{o1} 与 I_{o2} 只与 Q_{s1}/T , Q_{s2}/T 相关,与副边电流 i_{s1} 与 i_{s2} 下降

的斜率大小并无直接关系。因此,理论上,在不同的输出电压下该电路同样可以实现对输出电流的独立控制。

1.3 系统拓展

前两小节以两路输出为例,对基于后级调整的多路恒流输出控制方法进行了分析。本小节将介绍如何对这一控制方法进行拓展,使其适用于需要更多路输出的应用场合。

对需要 3 路恒流输出的应用场合,本研究应用 3 路输出反激变流器,3 路副边分别加上开关管 Q_1 , Q_2 , Q_3 。前两路的输出电流通过后级调整控制,第 3 路的输出电流反馈至原边由主 PWM 控制。为了保证在原边开关关断后 3 路副边不出现同时导通的情况,需要避免 Q_1 , Q_2 , Q_3 同时开通。

基于上述拓展方法,系统可拓展至 n 路输出。其中,前 $n-1$ 路输出电流通过后级调整控制,第 n 路的输出电流反馈至原边由主 PWM 控制。只要副边任意两路不会同时导通,就可以保证 n 路输出电流都是可独立控制的。

2 设计要点

2.1 副边 MOS 管的选择

基于上述分析,该驱动电源的基本结构与多路反激变流器类似。主要区别在于副边 MOS 管的选择以及反馈控制电路的设计。下面以 3 路输出变流器为例,讨论设计中需要注意的事项。作为参考,3 路变流器样机的电路原理图如图 5 所示。

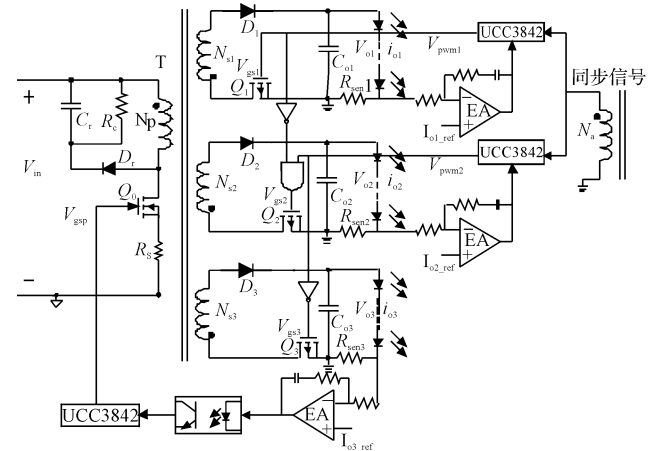


图 5 基于后级调整的 3 路变流器的样机原理图

如图 1、图 3 所示,示意图中副边 MOS 选用 N 沟道 MOS, 放置在高侧, 副边 MOS 不共地, 这为驱动及控制电路带了不便。如图 5 所示, 为了简化控制以及驱动方便, 副边 MOS 管可考虑采用 P 沟道 MOS, 放置在低侧, 从而实现副边 MOS 管的共地驱动。

下面讨论副边 MOS 管的耐压情况。假设 3 条输出支路副边的变压器匝数分别为 N_{s1}, N_{s2}, N_{s3} , 3 路输出电压分别为 V_{o1}, V_{o2}, V_{o3} 。考虑原边开关关断, 副边续流情况, 当 Q_1 导通, Q_2, Q_3 关断时, Q_2 的漏源电压为:

$$V_{ds2} = V_{o2} - V_{o1}N_{s2}/N_{s1} \quad (3)$$

Q_3 的漏源电压为,

$$V_{ds3} = V_{o3} - V_{o1}N_{s3}/N_{s1} \quad (4)$$

同理可得其他工作状态时副边 MOS 关断漏源电压大小。这样, 在进行 MOS 管选型时, 可根据其最大漏源电压选择耐压等级。

2.2 副边 MOS 管的控制

基于 1.2 节的分析可知, 该电路可以在不同输出电压下实现各路输出电流独立控制。要实现这一目标, 需要保证副边 MOS 管的工作时序正确, 导通时间互补。下面笔者将详细介绍 MOS 管工作时序的产生方法。

样机的控制电路如图 5 所示, 原边 PWM 控制芯片与副边后级调整控制芯片都采用 UCC3842。其中, 第 1、第 2 路输出由后级调整控制, 第 3 路输出则由原边 PWM 控制。通过加入辅助绕组, 给副边芯片 U_1 与 U_2 的 RT/CT 引脚加入同步脉冲, 保证 3 颗芯片同步工作。

后级调整控制芯片 U_1 产生 PWM 波 V_{pwm1} 。 V_{pwm1} 用以驱动 Q_1 。后级调整控制芯片 U_2 产生 PWM 波 V_{pwm2} 。由于 U_1 与 U_2 同步工作, V_{pwm2} 实际上包含了 Q_1 的驱动信号, 是 Q_1 与 Q_2 驱动信号的或信号。 V_{pwm1} 与 V_{pwm2} 经过逻辑运算后驱动 Q_2 。 V_{pwm2} 的非信号用来驱动 Q_3 。这样能保证 3 条支路的 MOS 管不会出现共通的情况。

与此同时, 为了保证 3 条支路环路的稳定, 需要确保由后级调整控制的环路响应较快, 由主 PWM 控制的环路响应较慢。

3 实验验证

为了验证上述理论分析的正确性与可行性, 本研究搭建了一台 3 路输出反激变流器, 并采用上述多路

表 1 3 路输出反激变流器多自由度恒流控制样机的关键参数

参数	符号	数值
输入电压/V	V_{in}	100
输出电流/A	$I_{o1}/I_{o2}/I_{o3}$	0.3/0.2/0.4
输出电压/V	$V_{o1}/V_{o2}/V_{o3}$	27/13/20
励磁电感/mH	L_m	0.5
变压器匝比	$N_p:N_{s1}:N_{s2}:N_{s3}:N_a$	39:18:19:20:5
工作频率/kHz	f_s	70
PWM 芯片	$U_0/U_1/U_2$	UCC3842
原边开关管	Q_0	SPA11N60C
副边续流二极管	$D_1/D_2/D_3$	MBR10100
副边开关管	$Q_1/Q_2/Q_3$	FQP17P06
滤波电容	$C_{o1}/C_{o2}/C_{o3}$	330 μ F/35 V

恒流控制方法独立控制各路输出电流。样机的关键参数如表 1 所示。

笔者设定 3 路输出电流分别为 0.3 A, 0.2 A, 0.4 A。3 路输出电压分别为 27 V, 13 V, 20 V, 3 路匝比为 18:19:20, 以验证多路恒流输出在不同输出电压和不同变压器匝比下的电流独立控制能力。

稳态工作下, 3 路输出电流及输出电压波形如图 6、图 7 所示。

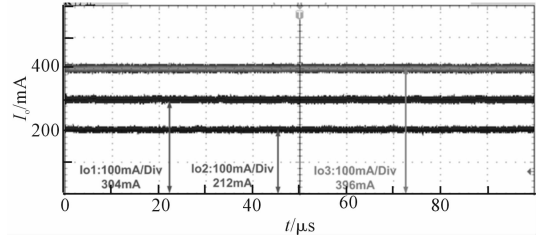


图 6 样机输出电流波形

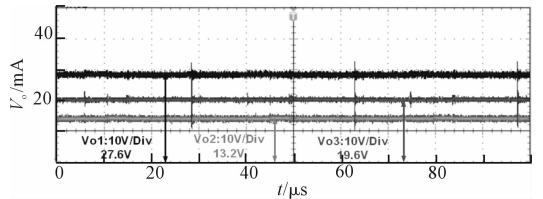


图 7 样机输出电压波形

3 路输出电流分别为 304 mA, 212 mA, 396 mA, 与设定值一致, 表明了 3 路输出电流的独立调节和控制能力。3 路输出电压分别为 27.6 V, 13.2 V, 19.6 V, 表明恒流输出控制与输出电压无关。实验验证了后级调整控制策略应用于多路恒流输出驱动电源的可行性。

副边 MOS 管 Q_1, Q_2 与 Q_3 的驱动信号波形如图 8 所示。由于副边 MOS 使用的是 P 沟道 MOS, 负电压导通, PWM 控制芯片的输出信号需要反相后驱动 MOSFET。由图 8 可知, 副边 3 颗 PMOS 管互补工作, 原边开关管导通期间, Q_1 也导通, 但此时支路 1 并无电流流过。因此, 真正 Q_1 导通电流的时间小于图 8 中所示 V_{gs1} 为负电压的时间, 只有原边开关管关断后, Q_1 才真正流过电流。

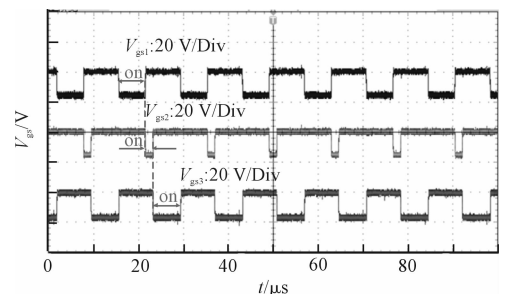


图 8 副边 Q_1 驱动 V_{gs1} , Q_2 驱动 V_{gs2} , Q_3 驱动 V_{gs3} 波形

3路副边电流 I_{s1} 、 I_{s2} 、与 I_{s3} 的波形如图9所示。副边电流在原边MOS管关断期间,分别传送给不同的输出支路。如图9所示,由于3路输出电压不同,3路电流波形下降的斜率有所不同,但励磁电感的伏秒是保持平衡的。

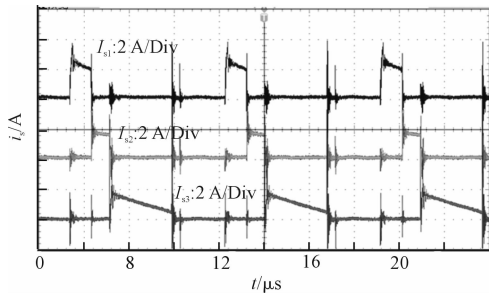


图9 副边电流 I_{s1} 、 I_{s2} 、 I_{s3} 波形

原边MOS管 Q_0 的漏极电压的波形如图10所示,可以看到, Q_0 的漏极电压有3个平台。这是由于3路输出的电压分别为27.6V、13.2V、19.6V。当3条支路依次导通时,反射电压的大小会随之改变,反映到 Q_0 的漏极电压上就产生了3个平台。

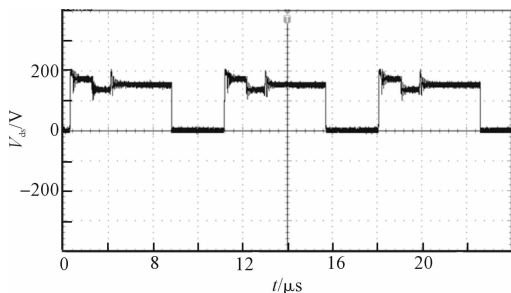


图10 原边MOS管 Q_0 的漏极电压波形

样机效率曲线如图11所示,可看到样机在额定功率下的效率在82%以上。

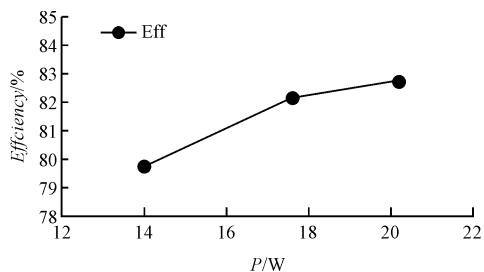


图11 样机效率曲线

以上实验结果表面,本研究所提出的LED驱动电

源具有输出多路电流的能力,且各路输出电流独立可控,不受输出电压的影响。该电源能有效简化LED驱动系统结构,降低成本,且效率较高。

4 结束语

本研究提出了一种基于后级调整技术的多路独立可控恒流输出LED驱动电源,该电源基于多路反激拓扑,仅用一个变流器就可同时驱动多路负载电流不同的LED串,简化了系统,节省了成本。本研究详细分析了所提出驱动电源的工作原理、拓展方法、与设计要点,通过样机实验验证了理论分析。

实验结果表明,该驱动电源能实现多路输出电流独立控制,样机性能良好,有较高的实用价值。

参考文献(References):

- [1] ZHANG J, ZENG H, JIANG T. Primary-side control scheme for high-power-factor LED driver with TRIAC dimming capacity[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4619-4629.
- [2] 曲小慧,唐亚鹏,WONG Siu-chung,等.一种高光效可独立调光的LED均流电路[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 21: 3432-3439.
- [3] WU X, ZHANG J, QIAN Z. A simple two-channel LED driver with automatic precise current sharing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4783-4788.
- [4] 徐示波,吕毅军,陈焕庭,等.基于二分法的RGB-LEDs配色研究[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(6): 7-10, 27.
- [5] 关烨锋,罗婉霞. LED RGB投光灯中的色散分析及其优化设计[J]. *照明工程学报*, 2014, 25(6): 95-99.
- [6] 董文辉,金天均,陈辉明. 后级调整技术在多路输出反激电路中的运用[J]. *电工技术学报*, 2005, 20(12): 64-68, 75.
- [7] 何颖彦,顾京磊,钱照明. 一种运用后级调整技术的新颖的多路输出正反激变流器[J]. *电源技术应用*, 2005, 8(3): 7-10.
- [8] 皇金锋. 多路输出单端反激开关变换器控制系统设计[J]. *电源技术*, 2013, 13(7): 1220-1222.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

王睿,王金华,张军明. 基于后级调整的多路独立可控恒流输出LED反激式驱动电源[J]. *机电工程*, 2016, 33(1): 101-105.

WANG Rui, WANG Jin-hua, ZHANG Jun-ming. Flyback multi-outputs LED driver with individual controllability based on secondary side post regulation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(1): 101-105.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>