

# 一种适用于空间辐照环境的自主均流电路研究

高东辉, 贺启峰, 徐成宝, 蔡可红

(中国电子科技集团公司第 43 研究所, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 针对均流控制芯片在空间辐照环境中应用的局限性, 在传统开关电源自主均流电路的基础上, 采用基于运放的分立器件结构, 提出了一种改进型开关电源自主均流电路, 只需采用辐照加固运放即可很好地应用于空间辐照环境中。该电路利用一个运放的交替工作来实现单向缓冲器和运放的功能, 简化了电路结构。同时通过在均流运放输出端与输出电压反馈端之间增加二极管, 解决了传统自主均流电路存在的负载调整度差的问题。详细分析了该电路的工作原理, 并在一款单端正激式 100 W 输出 DC/DC 变换器中对该电路进行了实验验证, 实验结果证明了该电路的有效性和实用性。

**关键词:** 开关电源; 自主均流; 抗辐照

中图分类号: TM46

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211535

中文引用格式: 高东辉, 贺启峰, 徐成宝, 等. 一种适用于空间辐照环境的自主均流电路研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(11): 116-119, 124.

英文引用格式: Gao Donghui, He Qifeng, Xu Chengbao, et al. Research on an automatic current-sharing circuit for space radiation environment[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(11): 116-119, 124.

## Research on an automatic current-sharing circuit for space radiation environment

Gao Donghui, He Qifeng, Xu Chengbao, Cai Kehong

(The 43 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

**Abstract:** In order to solve the application limitation of current sharing control chip in space radiation environment, on the basis of traditional switching power supply automatic current sharing circuit, using discrete device structure based on operational amplifier, an improved automatic current sharing circuit is proposed. It uses the alternating operation of an operational amplifier to realize the functions of a unidirectional buffer and an operational amplifier, which simplifies the circuit structure; In addition, a diode is added between the output of the current sharing operational amplifier and the output voltage feedback terminal, which solves the problem of poor load regulation in the traditional automatic current sharing circuit. The working principle of the circuit is analyzed in detail, the experimental verification of the circuit is carried out in a single-ended forward 100 W output DC/DC converter, the experimental results show the effectiveness and practicability of the circuit.

**Key words:** switching power supply; automatic current sharing; radiation resistance

### 0 引言

作为航空、航天系统二次电源用的 DC/DC 变换器主要采用单模块运行方式, 随着航空、航天技术的不断发展, 对 DC/DC 变换器的功率等级要求也越来越高, 采用多模块 DC/DC 变换器并联工作的需求日益迫切。由于不同模块之间存在的差异性会导致模块并联运行时电流分配不均, 从而降低系统的可靠性, 因此必须引入有效的均流控制电路来使系统稳定可靠工作<sup>[1-8]</sup>。

目前针对开关电源的均流控制, 推出了很多均流控制芯片, 如 TI 公司推出的 UC3902 系列等<sup>[9-13]</sup>。虽然均流控制芯片使用方便、结构简单, 但存在着采购周期长, 无法满足高等级、特殊环境的应用等问题。由于均流控制芯片结构复杂, 对芯片进行抗辐照加固难度大, 技术尚

不成熟, 目前国内外尚无加固的均流控制芯片。

针对均流控制芯片无法在空间辐照环境中应用的问题, 目前的通用方法是采用分立器件构成均流控制电路, 电路一般由运放、缓冲器、阻容元件、二极管等组成, 其中只有运放和缓冲器为辐照敏感器件, 选用具有抗辐照能力的器件即可满足空间应用需求。

抗辐照加固运算放大器和缓冲器电路结构简单, 芯片抗辐照加固相比于均流控制芯片更易于实现, 目前抗辐照加固运算放大器和缓冲器已在国内外得到广泛应用。

本文对传统的由分立器件构成的自主均流电路进行优化, 提出了一种电路结构简单、适用性强、成本低、精度高的开关电源自主均流电路。该均流电路只采用了

一个运算放大器,其余均为阻容器件和二极管,因而只需采用抗辐照加固的运放,即可很好地应用于空间辐照环境中。

### 1 传统外环调节自主均流电路

DC/DC 变换器自主均流控制策略主要有三种结构:外环调节结构、内环调节结构和双环调节结构<sup>[14-16]</sup>。其中外环调节结构由于具有均流精度高、结构简单、配置灵活、易于模块化、易于扩展和维护等优点而得到了广泛应用。本文所采用的控制策略为应用最为广泛的外环调节策略,典型的外环调节自主均流电路结构如图 1 所示。

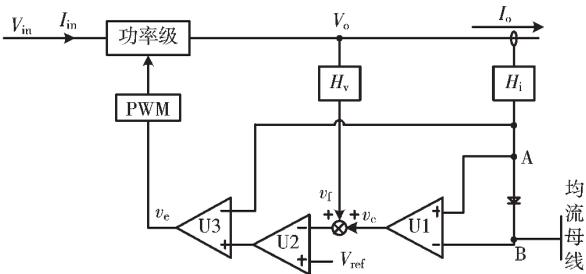


图 1 典型的外环调节自主均流电路

由图 1 可知,该自主均流电路为三环控制模式,从外到内依次是均流环、电压环和电流环。为了减小由于二极管管压降导致的主模块存在的均流误差,采用单向缓冲器结构代替图 1 中的二极管,如图 2 所示。

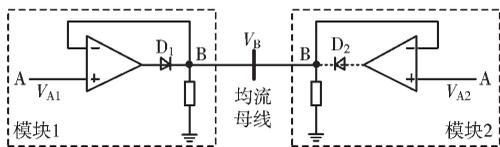


图 2 单向缓冲器电路

由图 2 可见,当  $V_{A1} > V_{A2}$  时,由单向缓冲器工作原理可知,均流母线电压  $V_B = V_{A1} > V_{A2}$ ,此时从模块的单向缓

冲器输出低电平,二极管  $D_2$  截止,二极管  $D_1$  导通。故均流母线电压与主模块采样电压相等,有效改善了图 1 中主模块由于二极管管压降而导致的均流误差。

### 2 改进型外环调节自主均流电路

结合图 1 和图 2 所示的电路结构,提出一种改进型外环调节自主均流电路如图 3 所示。

如图 3 所示,当模块作为主模块工作时,二极管  $D_3$  关断, $D_2$  导通,此时 U1 起到了图 2 中所示的单向缓冲器的作用;当模块作为从模块工作时,二极管  $D_2$  关断, $D_3$  导通,此时 U1 作为均流环运放工作。此种电路结构利用一个运放的交替工作模式实现了单向缓冲器和运放的功能,从而简化了电路结构。

此外,图 3 中在运放 U1 的输出端增加了二极管  $D_3$ ,通过合理的参数设计使得在单模块工作时二极管  $D_3$  关断,均流电路不工作,避免了单模块工作时均流电路对 DC/DC 变换器的影响。

针对图 1 结构存在的 DC/DC 模块的负载调整度差的问题,图 3 在主模块工作时,二极管  $D_3$  关断,均流电路不工作,主模块的负载调整度与均流环路无关,得到了很好的保证。同时在并联工作时,模块的输出电压跟随输出电压最高的模块,即从模块的输出电压跟随主模块,进而很好地改善了图 1 中存在的 DC/DC 模块并联工作时负载调整度差的问题。

#### 2.1 单模块工作原理

如图 3 所示,电压  $V_B$  可由式(1)计算得出:

$$V_B = V_{sense} \cdot K_i + V_{REF} \cdot K_v \quad (1)$$

其中,  $V_{sense}$  为电流采样得到的电压信号,  $V_{REF}$  为电压基准信号,  $K_i$ 、 $K_v$  分别为  $V_{sense}$  和  $V_{REF}$  的分压系数,一般通过分压电阻网络来实现该功能。

由运放的“虚断”原理可知:

$$\frac{V_A}{R_5} = \frac{V_C - V_A}{R_7} \quad (2)$$

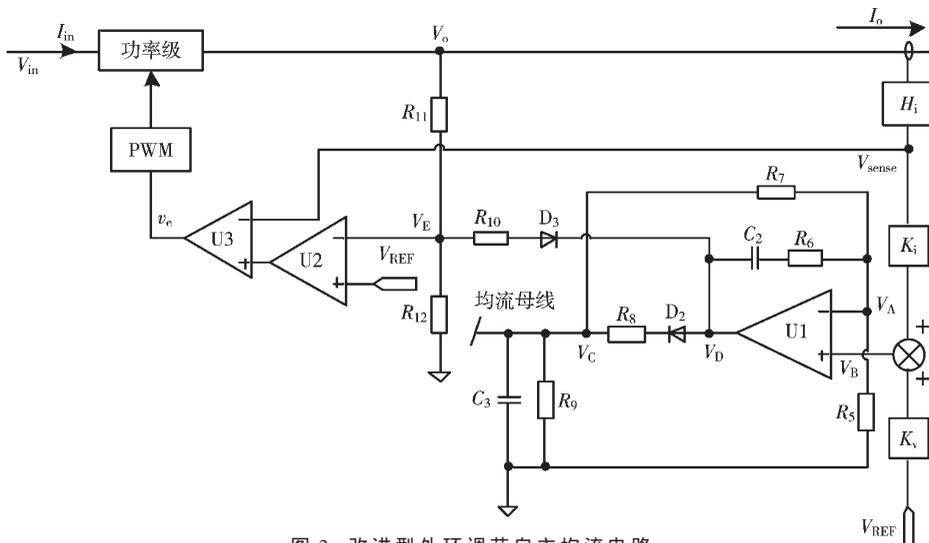


图 3 改进型外环调节自主均流电路

由运放的“虚短”原理可知：

$$V_A = V_B \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)可得均流母线电压  $V_C$  为：

$$V_C = V_B \cdot \left(1 + \frac{R_7}{R_5}\right) \quad (4)$$

假设二极管  $D_2$ 、 $D_3$  导通时的管压降均为  $0.7\text{ V}$ ，则均流运放  $U1$  的输出电压  $V_D$  为：

$$V_D = V_C + 0.7 = V_B \cdot \left(1 + \frac{R_7}{R_5}\right) + 0.7 \quad (5)$$

要使得单模块工作时，电压环不受均流电路的影响，二极管  $D_3$  必须关断，即必须使得反馈电压  $V_E$  (通常为  $2.5\text{ V}$ ) 和  $V_D$  的关系满足下式：

$$V_E < V_D + 0.7 \quad (6)$$

综合式(1)~式(6)，同时考虑最恶劣的情况，即空载时， $V_{\text{sense}} \approx 0\text{ V}$ ，则有：

$$V_{\text{REF}} \cdot K_v \cdot \left(1 + \frac{R_7}{R_5}\right) > 1.1 \quad (7)$$

通过匹配合适的参数来满足式(7)，即可实现 DC/DC 变换器单模块运行时在全负载范围内都可以避免均流电路的影响。

### 2.2 模块并联工作原理

两模块并联运行时的电路结构图如图 4 所示，两个模块的均流输出端通过均流母线连接在一起。

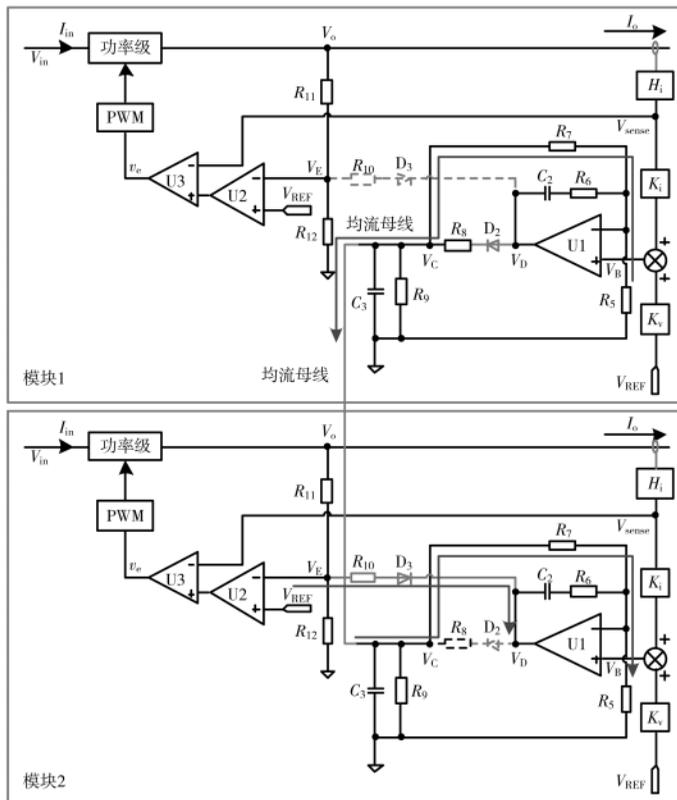


图 4 两模块并联结构图

由前述分析可知，单模块运行时，均流输出端的电压  $V_C$  反映的是模块初级电流的大小，当多模块并联运

行时，由于二极管  $D_2$  的作用，均流母线上的电压为输出电流最大的模块对应的  $V_C$  电压。

如图 4 所示，当两模块并联工作时，假设模块 1 中的电流大于模块 2 的电流时，则  $V_{C1} > V_{C2}$ ，此时模块 1 的二极管  $D_3$  截止，如图 4 所示，用虚线表示，模块 1 的均流电路未介入工作。 $V_{C1}$  会通过电阻  $R_5$  和  $R_7$  反馈到模块 2 的运放  $U1$  的反向输入端，此时  $U1$  的同相输入端电压小于反向输入端电压，则  $U1$  的输出被拉低，模块 2 的二极管  $D_2$  截止，如图 4 所示，用虚线表示。模块 2 的二极管  $D_3$  导通，模块 2 的均流电路开始工作，拉低  $V_E$ ，使得占空比增大，进而使得模块 2 的输出电压升高，从而导致模块 2 流过的电流会增加，模块 1 流过的电流会减小，最终达到均流的目的。图 3 中的  $R_5$ 、 $R_6$ 、 $C_2$  构成 PI 补偿器，用来补偿均流环路。

### 3 实验结果

为了验证上述电路的可行性和理论分析的正确性，将该均流电路应用到一款  $20\text{ V} \sim 50\text{ V}$  输入， $5\text{ V}/20\text{ A}$  输出的单端正激式 DC/DC 变换器中。

#### 3.1 单模块实验结果

为了验证图 4 中的二极管  $D_3$  对单模块工作时负载调整度的影响，图 5 给出了有/无图 3 中的二极管  $D_3$  时，DC/DC 变换器在空载切换到满载时输出电压跃变波形。

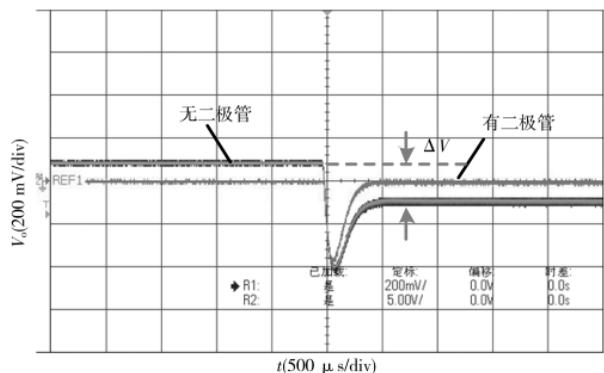


图 5 均流电路有/无二极管时模块的输出电压波形

从图 5 中可以看出，当电路中不加二极管  $D_3$  时，空载切换到满载时，输出电压出现了明显的下跌，负载调整度很差。当电路中增加二极管  $D_3$  时，空载到满载切换时，输出电压基本保持不变。由图 5 可见，该种均流电路可以很好地解决了图 1 中存在的 DC/DC 模块并联工作时负载调整度差的问题。

#### 3.2 两模块并联实验结果

当模块的均流端未连接在一起时，两模块并联输出带  $20\text{ A}$  时的稳态输出电流波形如图 6 所示，模块均流精度较差，经计算为  $11\%$ 。

将两个模块的均流端连接在一起，得到模块的输出电流波形如图 7 所示。从图 7 中可以看出，当模块的均流端连在一起时，输出电流在  $20\text{ A}$  和  $40\text{ A}$  之间跃变时，

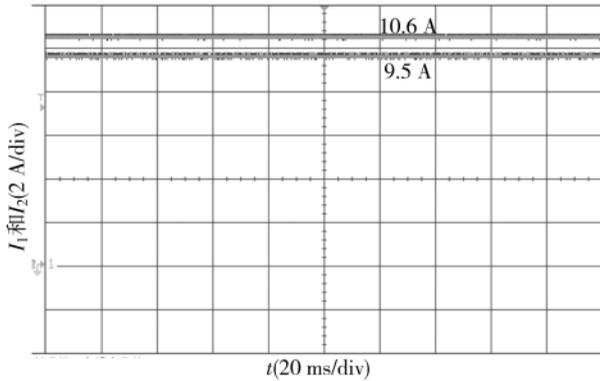
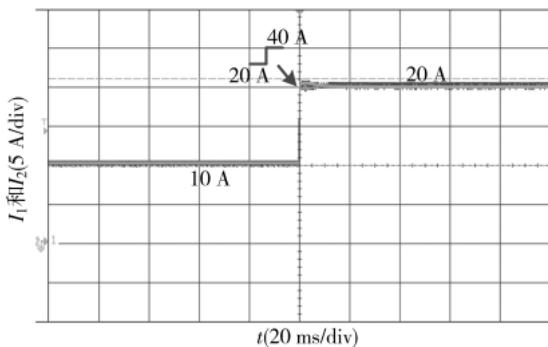
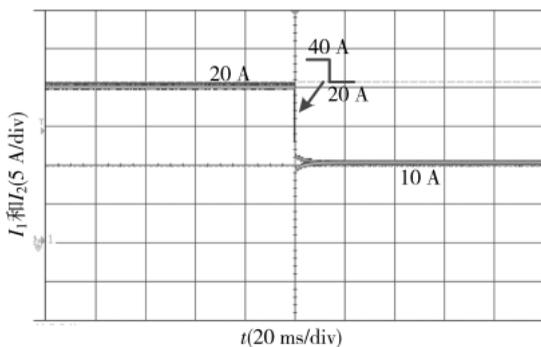


图6 均流端未连接时,并联模块输出电流波形



(a)输出电流由 20 A 跃变到 40 A 时的波形



(b)输出电流由 40 A 跃变到 20 A 时的波形

图7 均流端连接时并联模块输出电流波形

两模块的输出电流基本一致,模块达到了很好的静态和动态均流效果。

### 3.3 多模块并联实验结果

为了进一步验证采用该均流电路时多模块并联时的均流效果,进行了5模块并联实验,实测结果如表1所示。

从表1的实测结果可以看出,模块间均达到了很好

表1 5模块并联输出电流测试结果 (A)

总电流	1# 电流	2# 电流	3# 电流	4# 电流	5# 电流
1/4 载	5.1	5.0	4.8	5.1	4.9
1/2 载	10	9.8	9.8	10	10
3/4 载	15.1	14.8	14.8	14.9	15.2
满载	20.2	19.7	19.7	19.9	19.9

的均流效果,通过计算,在满载时,模块间的均流精度为2.5%。

### 4 结论

针对均流控制芯片在空间辐照环境应用的局限性,基于传统的自主均流电路,本文提出了一种改进型自主均流电路,相比于传统的自主均流电路而言,利用一个运放的交替工作来实现单向缓冲器和运放的功能,简化了电路结构。同时解决了传统自主均流电路存在的负载调整度差的问题。相比于均流控制芯片在空间辐照环境中应用的局限性,该电路中只需采用抗辐照加固的运放,即可很好地应用于空间辐照环境中,均流电路的环境适应性大大增强。

本文详细分析了该电路的工作原理,并在一款100 W输出的单端正激式DC/DC变换器中对其进行实验验证,实验结果证明了该电路的正确性和有效性。

### 参考文献

- [1] 张军明,谢小高,吴新科,等.DC/DC模块有源均流技术研究[J].中国电机工程学报,2005,25(19):31-36.
- [2] 丘东元,张波,韦聪颖.改进型自主均流技术的研究[J].电工技术学报,2005,20(10):41-47.
- [3] 李明,戴栋,马西奎,等.自主均流控制的并联Buck变换器稳定性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(15):7-15.
- [4] Lin Chang-Shiam, Chen Chern-Lin. Single-wire current-share paralleling of current-mode-controlled DC power supplies[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 780-786.
- [5] 韦聪颖,张波.开关电源并联运行及其均流技术[J].电气自动化,2004,26(2):3-5.
- [6] 程荣仓,刘正之,詹晓东.基于自主均流法模块并联的小信号分析[J].电力电子技术,2001(2):36-38.
- [7] ZHOU X, XU P, LEE F C. A novel current-sharing control technique for low-voltage high-current voltage regulator module applications[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2000, 15(6): 1153-1162.
- [8] MUSAVI F, AL-HADDAD K, KANAAN H Y. A large signal averaged modeling and control of paralleled DC/DC converters with automatic load sharing[C]. IEEE APEC, Texas, USA, 2005.
- [9] 孙存娟,王旭东.基于UC3902模块电源并联均流技术的研究[J].电力电子技术,2009,43(2):70-72.
- [10] Laszlo Balogh. The UC3902 load share controller and its performance in distributed power[R]. Texas Instruments, 2003.
- [11] JORDAN M. UC3907 load share IC simplifies parallel power supply design. Unitrode application note U-129, 1993-1994.
- [12] 王修岩,杨森,李宗帅.基于PIC单片机和UC3902的并联均流电源设计[J].电源技术,2016,40(2):423-424, 428.

(下转第124页)

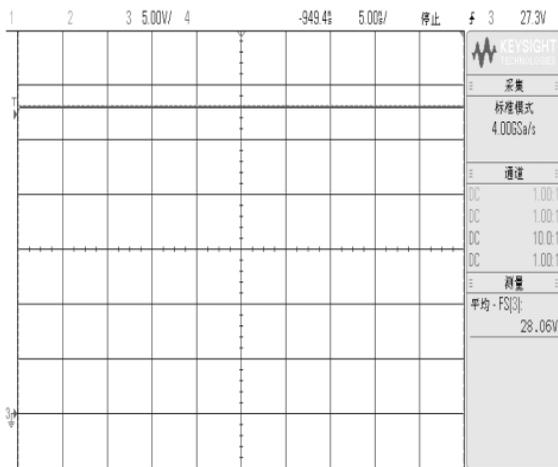


图8 28 V 输出电压波形图

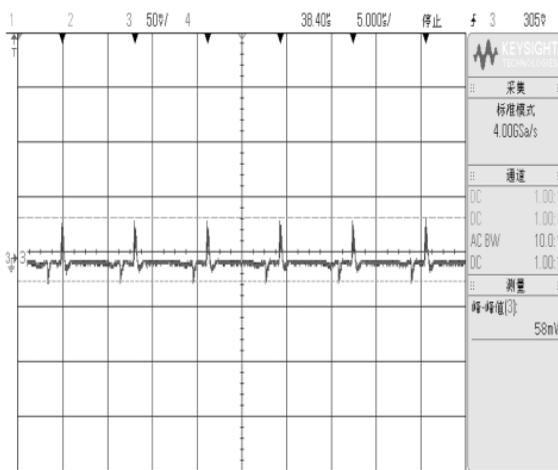


图9 28 V 输出电压纹波图

易于控制、可靠性高、成本低廉,能广泛地应用于各种设备和复杂实验工况,目前该电源已被用于双冷源除湿机的驱动控制主板供电。

参考文献

[1] 高梦莹,高小丽.RCD 钳位电路参数设计范围研究[J].电子电路设计,2019,41(4):65-67.  
 [2] 冯开勇.一种开关电源限流电路的设计[J].研究与设计,2019,36(10):19-21.

(上接第 119 页)

[13] 朱昆林,廖志清,曾旭初.基于 UCC39002 并联均流的恒压开关电源[J].电力电子技术,2009,43(7):66-68.  
 [14] 袁珊珊.中小功率 DC-DC 模块并联均流方案的优选及实现的研究[D].杭州:浙江大学,2006.  
 [15] 张军明.中功率 DC/DC 变流器模块标准化若干关键问题研究[D].杭州:浙江大学,2004.  
 [16] 肖文勋,张波,丘东元.改进平均电流自动均流法及其在 Boost 变换器并联系统中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(13):64-69.

[3] 孙佳,齐文娟,黄梓昂.电力电子课程设计实践平台的构建[J].实验室研究与探索,2017,36(10):244-247.  
 [4] 余锋.基于 UC3845 芯片的反激式开关电源设计[J].数字技术与应用,2016(7):182-183.  
 [5] 张房晴.单片开关电源及 pcb 设计[D].济南:山东建筑大学,2016.  
 [6] 刘梦珂,唐海洋.单端反激式开关电源的设计[J].电子设计工程,2017,25(1):175-178.  
 [7] 练新平.多路输出反激式开关电源的设计[J].科技与创新,2019(8):134-135.  
 [8] 杨帆,贺小林.反激开关电源初级侧 RCD 吸收回路的应用分析[J].日用电器,2020(1):57-61.  
 [9] 沙占友.特种集成电源最新应用技术[M].北京:人民邮电出版社,2000.  
 [10] 王志强.精通开关电源设计[M].北京:人民邮电出版社,2015.  
 [11] 张飞云,张鹏,杨灿.高频节能开关电源设计[J].许昌学院学报,2020,39(2):118-122.  
 [12] 于挽涛,冯则坤.反激变换器的漏感影响分析及钳位电路参数设计[J].磁性材料及器件,2016,47(6):37-41.  
 [13] 王昭昭,梅建伟,罗涛.反激变换器中 RCD 箝位电路参数设计[J].湖北汽车工业学院学报,2020,34(1):59-63.  
 [14] 代兴华,郑丽婷,赵瑞杰,等.反激变换器中吸收电路的设计[J].电子设计工程,2016,24(3):118-120.  
 [15] 杨枫.高压大功率开关电源相关技术研究[J].中国新通信,2018,20(24):221.  
 [16] 李文豪,廖建军.一种宽输入电压范围反激电源的研究与设计[J].电子与封装,2018,18(11):18-21.

(收稿日期:2021-04-21)

作者简介:

陈万兴(1982-),男,在职硕士,高级工程师,主要研究方向:嵌入式应用和电子技术应用。

高杰(1990-),通信作者,男,硕士,主要研究方向:电力电子,E-mail:1610645217@qq.com。

唐海洋(1990-),男,硕士,主要研究方向:电力电子。



扫码下载电子文档

(收稿日期:2021-03-20)

作者简介:

高东辉(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:开关电源设计、混合集成电路设计,E-mail:gdh0824@126.com。

贺启峰(1987-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:混合集成抗辐照开关电源。

徐成宝(1966-),男,本科,研究员级高级工程师,主要研究方向:混合集成电路设计。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所