

基于磁隔离双向传输的多功能 DC/DC 变换器设计

贺啟峰,高东辉,徐成宝

(中国电子科技集团公司第 43 研究所,安徽 合肥 230088)

摘要: 针对航天器单机系统对二次供电电源需求,以宇航用大功率多功能 DC/DC 变换器为研究对象,提出一种基于磁隔离双向传输反馈控制的 DC/DC 变换器电路结构,并在此电路基础上拓展出过流保护、禁止、并联均流等辅助功能。通过实际测试验证,采用该方案的产品性能指标优越,还具有良好的辅助功能。

关键词: 磁隔离双向传输反馈控制;过流保护;并联均流;DC/DC 变换器

中图分类号: TM46

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200062

中文引用格式: 贺啟峰,高东辉,徐成宝. 基于磁隔离双向传输的多功能 DC/DC 变换器设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 118–121, 126.

英文引用格式: He Qifeng, Gao Donghui, Xu Chengbao. The design of a multifunctional DC/DC converter based on magnetic isolation bidirectional transmission[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 118–121, 126.

The design of a multifunctional DC/DC converter based on magnetic isolation bidirectional transmission

He Qifeng, Gao Donghui, Xu Chengbao

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

Abstract: According to the requirement of spacecraft system for secondary power supply, a DC/DC converter circuit structure based on the feedback control of magnetic isolation bidirectional transmission is proposed for the aerospace high-power multifunctional DC/DC converter. Based on this circuit, the auxiliary functions such as over-current protection, forbidding and current sharing are developed. Through the actual test and verification, the product adopting this scheme has excellent performance indicators and good auxiliary functions.

Key words: feedback control of magnetic isolation bidirectional transmission; over-current protection; current sharing; DC/DC converter

0 引言

随着国内航天器系统性能的不断提升,整机单位对于高可靠、多功能、小体积的厚膜大功率 DC/DC 变换器的需求也越来越多。单机设计者为减少体积、简化设计、提高可靠性,往往希望所用的 DC/DC 变换器能够具有自我保护、远程遥控、多块产品并联等能力^[1]。在空间站、载人航天、商业卫星等航天领域中,许多用户提出了 66 W~120 W 大功率输出,具有过流保护、禁止、并联均流等辅助功能的抗辐照 DC/DC 变换器研发需求。目前,此类 DC/DC 变换器的来源主要依赖进口,如美国 Interpoint 公司的 MOR 系列 DC/DC 变换器。因此开发国产大功率多功能 DC/DC 变换器十分必要。

1 方案设计

1.1 主电路设计

开关电源的主电路通常包含两部分:主功率拓扑和反馈控制电路。

主功率拓扑结构是 DC/DC 变换器的基础。对于隔

离式 DC/DC 变换器,电路基本拓扑结构的选择主要有以下几种:单端正激式、单端反激式、推挽式、半桥式。鉴于该 DC/DC 变换器用于空间环境,主功率拓扑优先采用单端正激拓扑结构^[2]。从大功率输出的角度来考虑,优选单端正激拓扑结构。

常规 DC/DC 变换器通常采用光耦实现隔离反馈功能,而在空间辐照环境下,光耦的电流传输比下降明显,严重时会使 DC/DC 变换器开环,输出电压失控^[3]。因此,可采用对辐照不敏感的磁反馈隔离技术实现电路闭环控制,从而保证输出电压的稳定,提高 DC/DC 变换器抗辐照能力。此 DC/DC 变换器要求具有过流保护、禁止、并联均流等多个辅助功能,因此可设计磁隔离双向传输电路来实现反馈控制和辅助功能拓展。具体电路如图 1 所示。

图 1 中的电路功率级采用单端正激拓扑结构,在反馈控制部分,DC/DC 变换器初级采用 PWM 控制器和比较器生成与开关频率相同的载波信号,通过隔离变压器

电源管理 Power Management

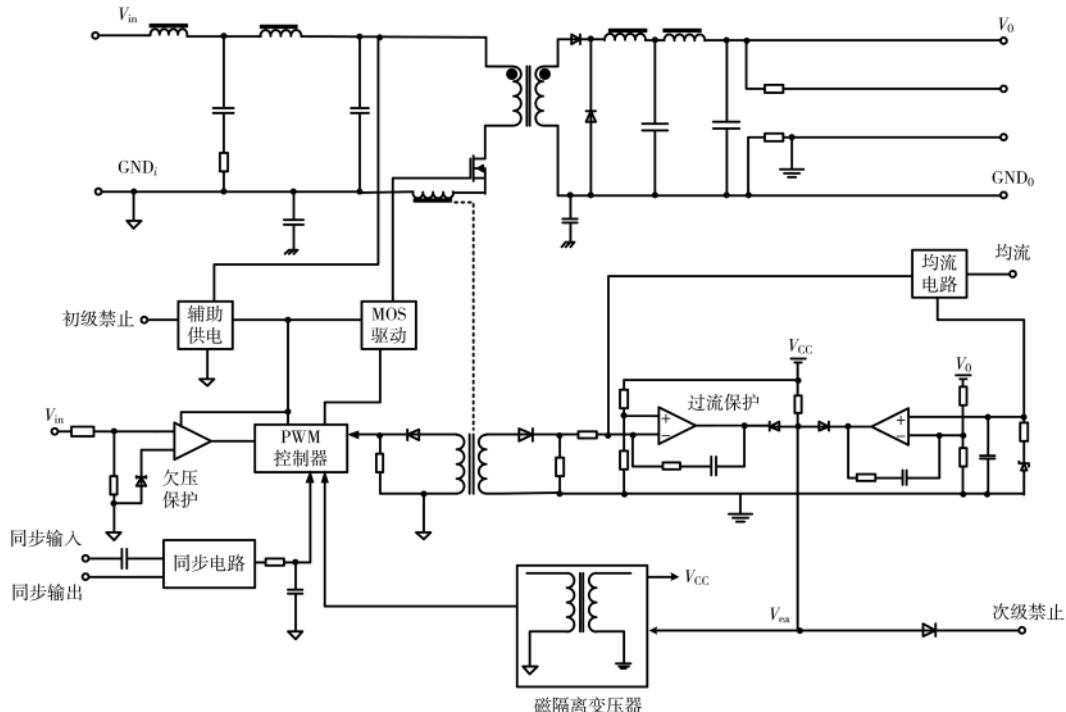


图 1 正激拓扑与磁隔离双向传输反馈的主电路

耦合至次级，经整流后为次级提供辅助供电电压 V_{cc} 。次级采用运算放大器和基准源作为输出电压比较放大单元，同时实现了输出过流保护功能。输出误差放大信号 V_{ea} 经幅度调制后，通过隔离变压器耦合至初级，并反馈至 PWM 控制器中，实现了电压反馈闭环控制^[4]。

同时通过电流互感器对初级母线电流进行取样调制，调制信号反馈回 PWM 控制器，实现电流反馈控制。通过以上双环(电流环与电压环)反馈控制，既实现了 DC/DC 变换器稳压输出，又保证了其良好的动态性能。

1.2 过流保护功能电路设计

以磁隔离双向传输电路为基础，进行过流保护电路设计，如图 2 所示。电流互感器对初级电流信号进行取样，取样信号分别送至 PWM 控制器电流环和过流保护电路中，这种方式避免采用取样电阻导致产品效率降低^[5]；初级母线电流信号 I_{pk} 由两部分组成，分别为：主变压器

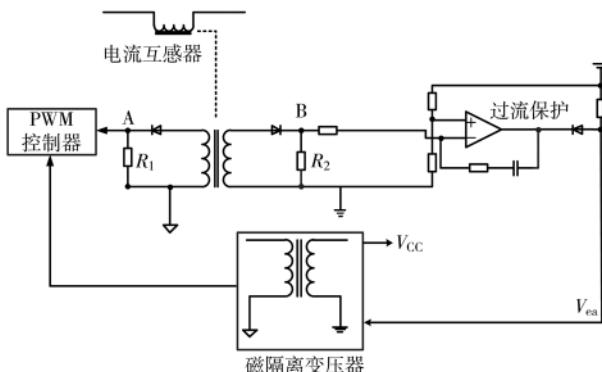


图 2 过流保护电路图

的磁化电流 I_{pk1} 和次级折算至初级的反馈电流 I_{pk2} 。

变压器磁芯的磁化电流如式(1)所示：

$$I_{pk1} = \frac{V_{in} \times D(V_{in})}{L_m \times f} \quad (1)$$

式中： D 为在输入电压 V_{in} 条件下占空比； L_m 为初级励磁电感； f 为开关频率。

次级电感电流纹波如式(2)所示：

$$\Delta I_0 = \frac{\left(V_{in} \times \frac{N_s}{N_p} - V_0 \right) \times D(V_{in})}{L_o \times f} \quad (2)$$

式中： L_o 为输出滤波电感； N_p 为主变压器初级匝数； N_s 为主变压器次级匝数。

次级折算至初级的反馈电流如式(3)所示：

$$I_{pk2} = \frac{N_s \times \left(I_0 + \frac{\Delta I_0}{2} \right)}{N_p} \quad (3)$$

初级电流信号峰值如式(4)：

$$I_{pk} = I_{pk1} + I_{pk2} \quad (4)$$

令互感器次级两个绕组匝数均为 50 圈，令 $R_1=R_2=24 \Omega$ ，则 A、B 点电压值，即互感器输出电压信号为：

$$V_{A_Peak} = V_{B_Peak} = \frac{I_{pk}}{2 \times 50} \times 24 \quad (5)$$

如图 2 所示，过流保护电路中，运算放大器的正向输入端连接基准电压(由 V_{cc} 与分压电阻构成)，反向输入端与电流互感器连接，运算放大器的输出经二极管与误差放大信号 V_{ea} 相连。当负载电流小于过流点时，运算放大器的正向输入端电压高于反向输入端电压，输出电位高于 V_{ea} ，二极管反向截止，该电路不影响正常主回路

电源管理 Power Management

输出电压反馈。当负载电流大于过流点时, V_{B_Peak} 大于正向输入端电压, 运算放大器输出电位低于 V_{ea} , 二极管导通; 产生的反馈信号经隔离变压器耦合至初级 PWM 控制器中, 减小 PWM 输出占空比, 进而使输出电压降低, 最终维持过流取样电流恒定, 即输出电流稳定在过流点, 从而实现输出过流保护功能。

这种过流保护电路可以很好地实现短路保护, 且能够实现精确的过流保护, 过流保护恢复区域小, 带容性负载能力强。

1.3 禁止功能电路

用户可以通过禁止功能来控制产品上电断电, 禁止功能包括初级禁止功能和次级禁止功能。初级禁止功能电路如图 3(a)所示, 禁止端连接辅助供电电路基准点, 还连接欠压保护电路输入端。当初级禁止端接地时, 辅助供电电路停止供电, 同时由欠压保护输入端被拉低, 产品进入欠压保护状态, 产品无输出。

在图 1 中, 次级禁止功能可直接通过二极管拉低 V_{ea} 电平来达到次级禁止的目的, 不过采用该方法次级禁止端开路电压在空载、满载时变化较大。对电路进行改进, 通过 PNP 三极管来拉低 V_{ea} 电压, 如图 3(b)所示, DC/DC 变换器稳定工作时, 次级禁止端开路电压近似等于 V_{cc} 。

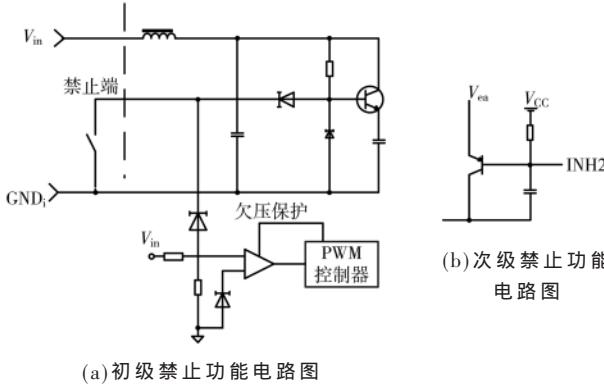


图 3 禁止功能电路图

1.4 并联均流功能电路设计

在大于 120 W 功率的使用场合中, 单只厚膜 DC/DC 变换器模块功率难以满足系统要求, 往往需要多个模块并联输出使用, 但每个模块内阻抗不可能完全一致, 这使得各个模块分配到的输出电流出现差异。某些模块输出电流很大, 另外一些模块输出电流很小, 甚至不输出。输出电流大的模块热应力增大, 从而降低系统可靠性。因此, 必须设计均流功能电路, 将负载电流平均地分配给每一个模块上^[6]。

为最大程度减少单点失效, 可采用最大均流法来实现均流。设计均流功能电路如图 4 所示, 均流电路的输入与过流保护电路的输入一致, 均来自电流互感器取样信号 V_{B_peak} 。 V_{ref} 为次级基准电压, V_{com} 为均流母线电压, 运算放大器输出 A 点连接 DC/DC 变换器输出电压取样

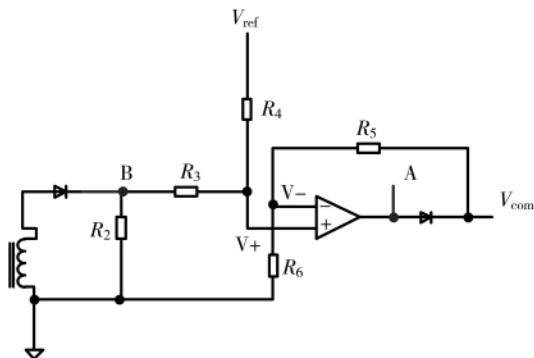


图 4 均流功能电路图

反馈部分。当运算放大器输出低电平时, DC/DC 变换器输出电压被抬高。

图 4 中的均流电路实质上是由运算放大器组成的加法器。根据运算放大器的虚断特性, 可得出以下公式:

$$\frac{V_-}{R_6} = \frac{V_{com} - V_-}{R_5} \quad (6)$$

$$\frac{V_+ - V_{B_peak}}{R_3} = \frac{V_{ref} - V_+}{R_4} \quad (7)$$

根据运算放大器的虚短特性, $V_+ = V_-$, 将其代入式(6)、式(7)中, 则有:

$$\frac{R_6}{R_3 + R_6} V_{com} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} V_{ref} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{B_peak} \quad (8)$$

当多块产品并联使用时, 所有模块的均流母线连在一起, 输出电流最大的模块 V_{B_peak} 变大, 根据式(8), V_{com} 增大, 该模块为主模块。此时对于其他从模块, 由于 V_{com} 增大, 各个从模块中运算放大器的 V_- 大于 V_+ , 运算放大器输出低电平, 从模块输出电压升高, 输出电流变大, 从而达到均流目的。

2 试验结果

将以上方案应用到 XX28D15 型大功率抗辐照 DC/DC 变换器产品中进行验证, 该产品输入电压为 16 V~40 V (标称 28 V), 输出为 ±15 V/4 A。对产品的关键波形和实测数据进行记录。

2.1 关键波形

2.1.1 启动波形

启动波形如图 5 所示, 在输入电压为标称 28 V 时, 满载启动; 启动过冲电压为 0 V, 启动延时 4.4 ms。产品上电启动情况良好。

2.1.2 内部 MOS 管漏极波形

在输入电压为 28 V、满载工作条件下, MOS 管漏极峰峰值电压为 60 V, 开关频率为 531 kHz, 占空比为 38.7%。图 6 是典型的正激电路 MOS 管漏极波形, 产品运行状态稳定。

2.1.3 负载瞬变时输出电压变化波形

负载电流从满载到半载瞬变时, 波形如图 7 所示, 输出电压瞬态变化为 522 mV/−527 mV, 恢复时间为 258 μs/258 μs。产品动态性能良好。

电源管理 Power Management

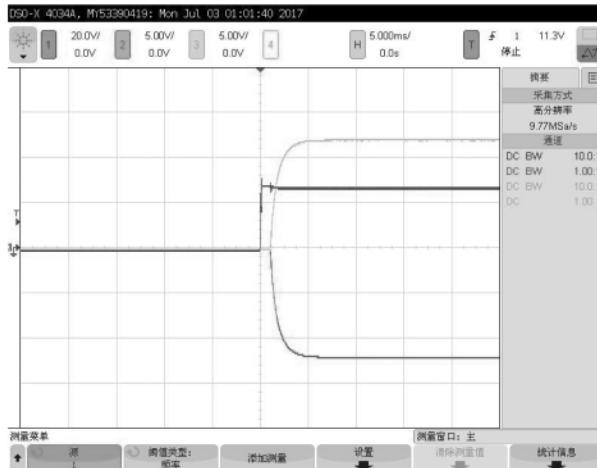


图 5 28 V 输入 , 满载启动波形

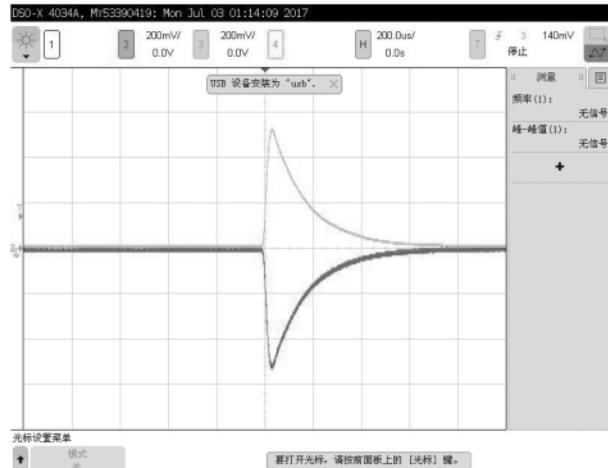


图 7 100%~50% 负载跃变输出波形

2.2 实测数据

此产品实测数据与美国 Interpoint 公司对标产品 MOR2815D 进行对比, 结果如表 1 所示。

通过对比, 该产品测试结果基本上满足 MOR2815D 电性能指标要求, 而且部分指标更优。对 XX28D15 的辅助功能进行测试, 测试结果如下:

- (1) 过流保护: 过流点为额定输出电流的 1.3 倍, 即 5.2 A, 短路功耗 26.5 W;
- (2) 初级禁止: 禁止端 1 连到输入地端时, 产品无输出, 输入电流为 2 mA;
- (3) 次级禁止: 禁止端 2 连到输出地端时, 产品无输出, 输入电流为 36 mA;
- (4) 均流功能: 能够实现五块产品并联使用, 均流精度为 2.1%。

综上所述, 该设计方案是可行的, 有效的。

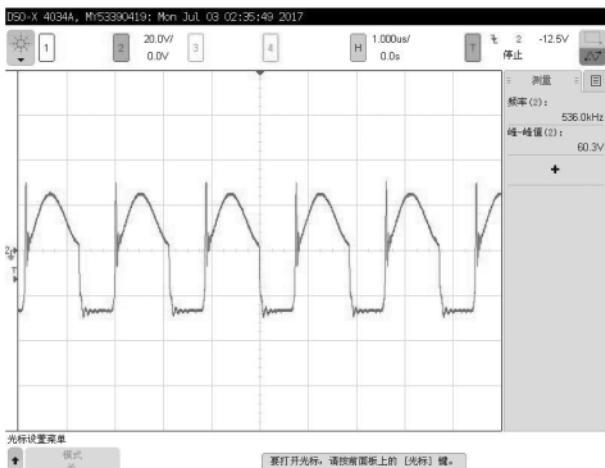


图 6 28 V 输入 , 满载时 MOS 管漏极波形

3 结论

本文首先对宇航用大功率多功能 DC/DC 变换器的

《电子技术应用》2020 年 第 46 卷 第 7 期

(下转第 126 页)

表 1 产品实测数据与 MOR2815D 主要指标对比

特性	MOR2815D(极限值)		产品实测值
	最小	最大	
输出电压/V	14.7,-14.62	15.3,-15.38	14.974,-14.974
输入电压/V	16	40	16~40
输出电流/A	4	4	4
输出纹波电压/mV	-	150	46,66
电压调整度/mV	-	50,100	1,10
电流调整度/mV	-	50,200	1,31
效率%	83	-	87.1
短路功耗/W	-	30	26.5
开关频率/kHz	480	580	531
负载瞬变时输出电压变化/mV	-	±600;±600	522,-527;-520,522
负载瞬变时输出电压恢复时间/μs	-	300;300	258,258;240,240
启动过冲/mV	-	25	0
启动延迟/ms	-	10	4.4
容性负载/μF	-	1 000	1 000

应用现状进行分析, 然后对 DC/DC 变换器的主电路和功能电路分别进行描述, 重点分析磁隔离双向传输电路、过流保护功能电路、禁止功能电路、并联均流功能电路的设计思想和实现方式。最后, 结合具体产品对设计方案进行验证, 给出关键波形与实测数据。结果证明基于磁隔离双向传输电路的多功能 DC/DC 变换器设计方案是可行的、合理的, 并且具有一定的优越性。

参考文献

- [1] 王诗斌, 于喜河, 苏建. 空间有效载荷二次电源可靠性设计[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 317~319.
- [2] 张莹. DC/DC 变换器抗辐照表征关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [3] 李详忠, 朱彬王, 善良姜, 等. 磁反馈控制 DC/DC 变换器的设计[J]. 电器与控制, 2015, 34(7): 92~94.
- [4] IRVING B T, JOVANOVIC M M. Design considerations for magnetic feedback using amplitude modulation[C]. 2008

电源管理 Power Management

- Letters , 2009 , 45(1) : 36–37.
- [9] BELLAR M D , WATANABE E H , MESQUITA A C . Analysis of the dynamic and steady-state performance of Cockcroft–Walton cascade rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics , 1992 , 7(3) : 526–534.
- [10] REGINATO L L , SMITH B H . A 600-kV , 10-mA DC Cockcroft–Walton rectifier using silicon diodes at 100 kc[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science , 1965 , 12(3) : 274–278.
- [11] YOUNG C M , CHEN H L , CHEN M H . A Cockcroft–Walton voltage multiplier fed by a three-phase-to-single-phase matrix converter with PFC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications , 2014 , 50(3) : 1994–2004.
- [12] IQBAL S . A three-phase symmetrical multistage voltage multiplier[J]. Power Electronics Letters , IEEE , 2005 , 3(1) : 30–33.
- [13] SU T L , ZHANG Y M , CHEN S W , et al . A 600 kV 15 mA Cockcroft–Walton high-voltage power supply with high stability and low-ripple voltage[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators , Spectrometers , Detectors and Associated Equipment , 2006 , 560(2) : 613–616.

(收稿日期 : 2020–03–22)

作者简介 :

张迪(1985–),男,博士,工程师,主要研究方向:高压高频变换器、电推进电源。

张东来(1973–),男,博士,教授,主要研究方向:航天器电源、建模与控制、无损检测。

王子才(1932–),通信作者,男,博士,教授,主要研究方向:自动控制、系统仿真领域以及复杂大系统分布式仿真工程设计方法,E-mail:wzc@hit.edu.cn。

(上接第 117 页)

- 计算机应用 , 2006(S2) : 307–309 .
- [10] 张震波 , 杨鹤标 , 马振华 . 基于 LRU 算法的 Web 系统缓存机制[J]. 计算机工程 , 2006 , 32(19) : 68–70 .
- [11] 段翰聪 , 卢显良 , 宋杰 . 基于 EPOLL 的单进程事件驱动通信服务器设计与分析[J]. 计算机应用 , 2004 , 24(10) : 36–39 .
- [12] 潘圆圆 , 李德华 . C++ 中的原子操作及其使用[J]. 计算机与数字工程 , 2013 , 41(11) : 1853–1855 .

- [13] 赵鲲鹏 , 苏葆光 . Linux 内存管理中的 Slab 分配机制[J]. 现代计算机 , 2006(5) : 91–93 .

(收稿日期 : 2019–10–08)

作者简介 :

黄向平(1982–),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:民航信息化技术。

彭明田(1967–),男,硕士研究生,教授级高级工程师,主要研究方向:民航信息化技术。

杨永凯(1977–),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:民航信息化技术。

(上接第 121 页)

- Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition , 2008 .
- [5] 张登 , 付寒瑜 , 杨亮 . 开关电源的过流保护[J]. 舰船电子对抗 , 2008 , 31(1) : 115–117 .
- [6] 游江 , 孟繁荣 , 张敬南 . 基于回路成形的并联 DC/DC 变换器均流控制器设计[J]. 中国电机工程学报 , 2019 , 39(2) : 585–593 .

(收稿日期 : 2020–01–30)

作者简介 :

贺啟峰(1987–),通信作者,男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:混合集成抗辐照开关电源,E-mail:a9661355@163.com。

高东辉(1990–),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向:电力电子。

徐成宝(1966–),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:开关电源控制与设计。

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