

一种输出可调的非隔离抗辐射高压 DC/DC 变换器设计与分析

李媛媛^{1,2}, 王毅^{1,2}, 丁瀚^{1,2}

1. 中国电子科技集团公司第四十三研究所安徽省微系统重点实验室, 安徽 合肥 230088

2. 中国电子科技集团公司第四十三研究所, 安徽 合肥 230088

DOI: 10.61369/TACS.2025050035

摘 要 : 本文提出一种输出可调的非隔离抗辐射高压 DC/DC 变换器设计方案, 并通过一款 45V ~ 150V 抗辐射高压 DC/DC 变换器的设计分析和软件仿真及实测数据, 验证该技术方案在抗辐射高压 DC/DC 变换器上的应用是可行有效的。

关 键 词 : 非隔离; 输出可调; 抗辐射; 高压 DC/DC 变换器

Design and Analysis of a Non-Isolated Radiation-Resistant High-Voltage DC/DC Converter with Adjustable Output

Li Yuanyuan^{1,2}, Wang Yi^{1,2}, Ding Han^{1,2}

1. The 43rd Research Institute of CETC, Hefei, Anhui, 230088

2. Anhui Provincial Key Laboratory of Microsystem, Hefei, Anhui 230088

Abstract : This paper proposes a design scheme for a non-isolated radiation-resistant high-voltage DC/DC converter with adjustable output. Through the design and analysis, software simulation, and experimental test data of a 45V ~ 150V radiation-hardened high-voltage DC/DC converter, it is verified that this technical solution is feasible and effective for application in radiation-hardened high-voltage DC/DC converters.

Keywords : non-isolated; adjustable output; radiation-hardened; high-voltage DC/DC converter

引言

抗辐射 DC/DC 变换器是航天器供电单元的核心器件, 直接决定航天器能否正常运行。以 Interpoint 公司、VPT 公司等为代表的国外公司, 推出的抗辐射 DC/DC 变换器已系列化、标准化。43 研究所在抗辐射开关电源领域进行深入研究, 研制出一系列典型产品^[1]。

本文给出一种非隔离高压抗辐射 DC/DC 变换器设计方案, 并设计一款输出线性可调的非隔离高压抗辐射 DC/DC 变换器, 通过软件仿真及电路实测结果, 验证该设计方案是可行有效的^[2]。

一、输出可调非隔离抗辐射高压 DC/DC 变换器原理分析

(一) 反馈方式比较分析

开关电源常用的反馈方式有隔离反馈和非隔离反馈两种方式。对于抗辐射 DC/DC 变换器, 常用的隔离反馈技术方案有使用脉冲幅度调制器的磁反馈、变压器磁反馈。使用脉冲幅度调制器的磁反馈和变压器磁反馈一般元器件较多, 体积较大。非隔离反馈电路结构简单, 元器件少, 反馈延迟环节少, 有利于实现小型

化, 并且更容易满足高压抗辐射设计要求^[3]。

通过以上分析, 本电路采用非隔离反馈电路实现高压抗辐射 DC/DC 变换器的研制。

(二) 非隔离电源原理分析

输入电压经输入滤波, 由辅助供电电路给 PWM 脉宽调制器提供工作电压, 产生功率转换部分 MOS 管的驱动信号, 经变压器隔离、耦合, 输出经整流滤波后得到所需要的输出电压。为实现输出电压的稳定, 对输出电压取样, 经误差比较放大送至 PWM, PWM 控制输出信号的占空比, 从而实现输出电压的闭环控制^[4]。

原理框图如图1。

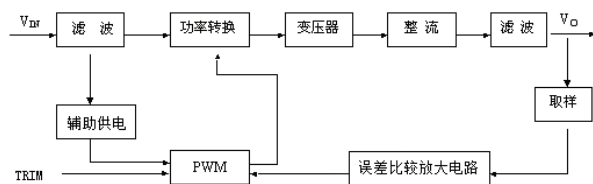


图1 非隔离高压输出开关电源原理框图

(三) 线性可调功能设计

图2为线性可调功能电路结构示意图。TRIM 脚为调整端，调整端电压线性控制输出电压，其输入电压范围0.72V ~ 2.4V，对应输出电压在45V ~ 150V 线性可调。输出电压的取样电压信号接在N1 (PWM) 的1脚，调整端接在N1的2脚，调整端电压作为电压基准与输出电压的取样电压比较，得误差信号，经N1的内部误差放大器放大后反馈到N1的COMP 端，控制N1输出驱动信号占空比的变化，从而使输出达到稳定^[5]。

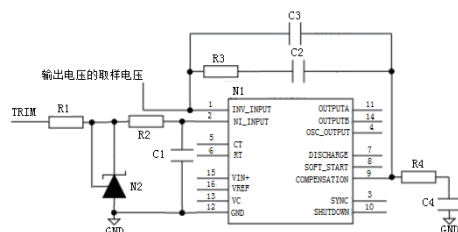


图2 线性可调功能电路结构示意图

二、主要电路设计

(一) 主要技术指标要求

输入直流电压：10.5V ~ 16.5V；

(1) 输出直流电压：150V ± 1.5V，

(2) 45V ~ 150V 线性可调；

(3) 输出电流：50mA；

(4) 转换效率：68%；

(5) 电压调整率：≤ 2%；

(6) 电流调整率：≤ 2%；

(7) 输出纹波电压：≤ 200mV；

(8) 抗辐射能力：

TID ≥ 30krad (si)，LET ≥ 37MeV · cm²/mg。

为实现该技术指标，根据设计方案设计电路参数^[6]。

(二) 变压器设计

f_s 开关频率设计为85kHz，脉宽调制器输出脉冲的最大占空比Dmax 为0.45，最低输入电压为Vinmin，Vdson 为MOS管漏极导通压降，Vdiode 为快恢复整流二极管正向导通压降，Ae 为磁罐磁芯的有效横截面积，ΔB 为磁通密度变化量。变压器原边绕组匝数为 N_p ，变压器副边绕组匝数为 N_s ^[7]。

(1) 计算变压器原边匝数：

$$N_p = \frac{(V_{inmin} - V_{dson}) \times 2 \times D_{max}}{f_s \times \Delta B \times A_e} \approx 10.546$$

(2) 计算变压器原、副边匝数比：

$$N = \frac{N_p}{N_s} = \frac{(V_{inmin} - V_{dson}) \times 2 \times D_{max}}{\frac{V_o}{2} + V_{diode}} \approx 0.118$$

计算变压器副边绕组匝数：

$$N_s = \frac{N_p}{N} \approx 84.556$$

由此计算得到变压器的匝比和原、副边匝数，通过计算复核以及电路试验验证，最终得到的变压器原边匝数为10圈，副边匝数为85圈^[9]。

(三) 输出整流滤波电路设计

输出整流滤波电路采用二倍压电路，利用电容的储能作用，实现二倍的直流电压输出，该电路的优点是可将变压器的匝比减半，既减小变压器的漏感和分布电容的影响，又降低电路对绝缘强度的要求，还可以降低对电路元器件耐压的要求，同时减小了体积。电路图见图3。

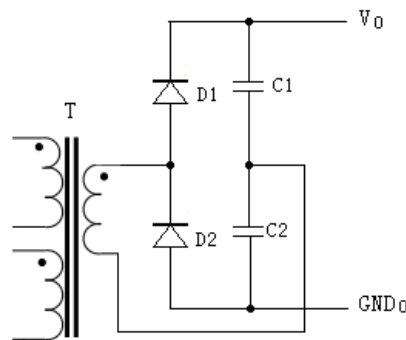


图3 输出整流滤波电路

$$\text{根据公式: } V_{sd} = V_{in(max)} \times \frac{N_s}{N_p} = 16.5 \times \frac{85}{10} = 140.25V$$

计算整流器在最大输入电压下电压应力最大达140.25V，因此选择反向耐压高的超快恢复二极管。

(四) 元器件选用

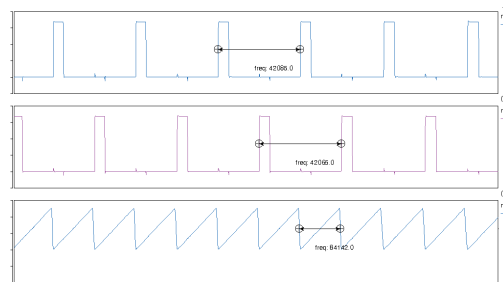
(1) 选用抗辐射加固器件，包括功率MOS管、脉宽调制器、运算放大器等有源器件，如功率MOS管，选择采用抗辐射MOS器件工艺的半导体器件；

(2) 通过计算电压、电流应力，根据《元器件降额准则》进行降额设计，合理选择元器件^[10]。

三、电路仿真与测试结果

(一) 仿真结果

采用Saber 仿真软件仿真得到的PWM 时钟振荡波形、MOS 栅极驱动波形和启动电压波形如图4所示。从图中可看出输出电压没有启动过冲，电路工作稳定。



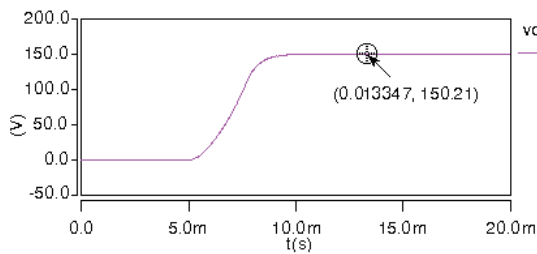


图4 仿真波形图 (PWM 时钟振荡、MOS 栅极驱动、启动电压)

(二) 测试结果

实测波形见图5~图9。可以看出,输出电压没有启动过冲,功率开关管漏极电压波形正常;输入电压16.5V时,功率开关管电压应力达到最大约39V,快恢复整流二极管反向电压最大为157V,与计算值基本一致;输出纹波电压较小,DC/DC 变换器工作稳定。

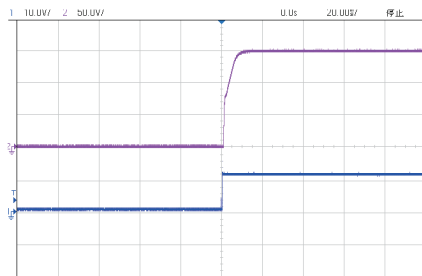


图5 启动电压波形图

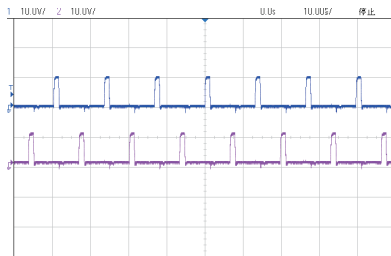


图6 功率开关管栅极电压波形图

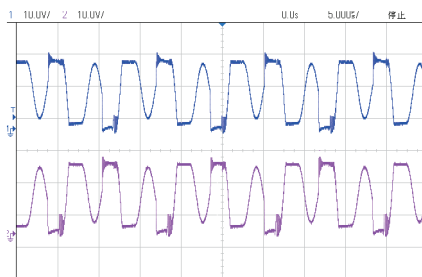


图7 功率开关管漏极电压波形图

参考文献

- [1] 张占松 蔡宣三. 开关电源的原理与设计 (修订版)[M]. 电子工业出版社, 1998.
- [2] Sanjaya Maniktala. 精通开关电源设计 [M]. 人民邮电出版社, 2008.
- [3] Abraham I.Pressman. 开关电源设计 (第三版)[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [4] Li Dan, 李丹, Yu Wanneng, 等. 一种光伏发电 DC-DC 变换器研发 [C]// 福建省电机工程学会学术年会. 福建省电机工程学会, 2014.
- [5] 吕洋. 一种非隔离型高增益 DC/DC 变换器仿真分析 [J]. 东北电力技术, 2023, 44(3):18-21.DOI:10.3969/j.issn.1004-7913.2023.03.004.
- [6] 丁峰, 王辉, 李圣乾, 等. 一种基于 DCM 单元的高压非隔离型 DC/DC 变换器 [J]. 广东电力, 2020(1):43-52.
- [7] 刘芳, 李研, 朱永平, 等. DC-DC 变换器拓扑族归一化分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23):9362-9373.
- [8] 郑昊. 面向光储直柔的家用直流微网混合储能系统变换器设计 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [9] 李海滨, 颜霄, 翁雨森, 等. 软开关高增益准 YZ 源 DC-DC 变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11):4435-4445.
- [10] 李俊波, 闫鹏, 魏业文, 等. 一种新型 SEPIC 可拓展高增益 DC-DC 变换器 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4):64-74.DOI:10.15938/j.emc.2023.04.007.

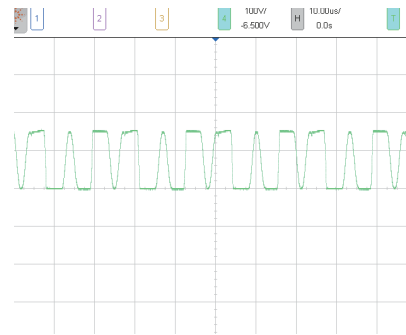


图8 快恢复整流二极管电压波形图

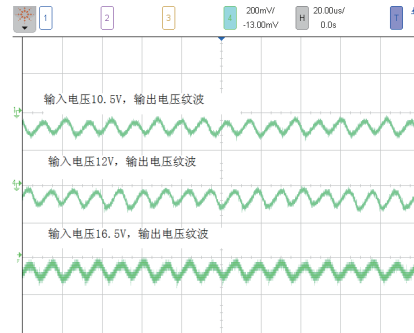


图9 输出纹波电压波形图

电路实测结果与设计指标对比如表1所示,实测结果达到设计目标。

表1 主要技术指标实测结果与设计指标对比

特 性	设计指标	实测指标
输入电压范围	10.5V ~ 16.5V	10.5V ~ 16.5V
输出电压	150V ± 1.5V	150.33V
	45V ~ 150V 线性可调	45V ~ 150V 线性可调
输出电流	50mA	50mA
输出纹波电压	≤ 200mV	143mV
电压调整率	≤ 2%	0.047%
电流调整率	≤ 2%	0.013%
效率	≥ 68%	70.8%

四、结论

经分析论证,本文设计一款输出电压线性可调的非隔离抗辐射高压 DC/DC 变换器 (45V ~ 150V), 通过电路仿真和实测技术指标比对,充分验证该技术方案是非常可靠有效的。