

# 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<sup>1,2</sup>, 王毅<sup>1,2</sup>, 丁瀚<sup>1,2</sup>

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<sup>1,2</sup>, Wang Yi<sup>1,2</sup>, Ding Han<sup>1,2</sup>

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<sup>[1]</sup>。

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<sup>[2]</sup>。

## 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<sup>[3]</sup>。

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<sup>[4]</sup>。

作者简介: 李媛媛 (1981.11—), 女, 安徽界首人, 汉族, 硕士研究生, 高级工程师。

原理框图如图1。

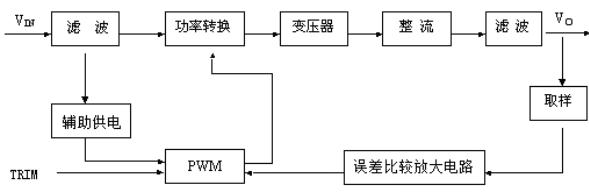


图1 非隔离高压输出开关电源原理框图

### (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<sup>[5]</sup>。

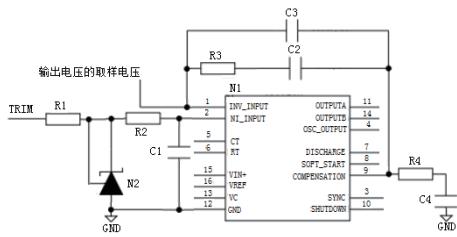


图2 线性可调功能电路结构示意图

## 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 · cm<sup>2</sup>/mg。

为实现该技术指标，根据设计方案设计电路参数<sup>[6]</sup>。

### (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  $V_{in\min}$ ， $V_{dson}$  为 MOS 管漏极导通压降， $V_{diode}$  为快恢复整流二极管正向导通压降， $A_e$  为磁罐磁芯的有效横截面积， $\Delta B$  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  $N_s$ <sup>[7]</sup>。

(1) 计算变压器原边匝数：

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

(2) 计算变压器原、副边匝数比：

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

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<sup>[9]</sup>。

### (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。

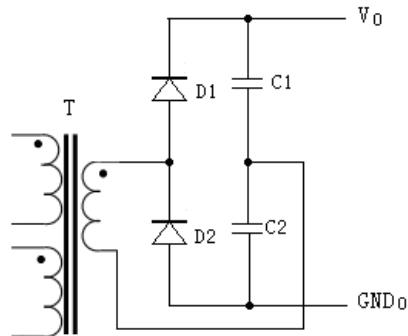


图3 输出整流滤波电路

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

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

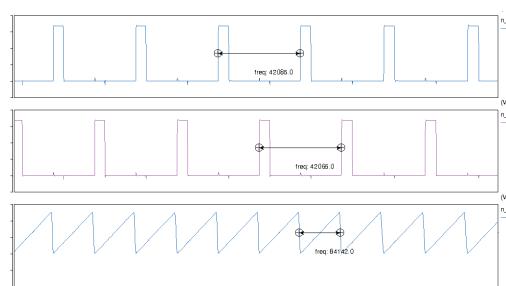
(1) 选用抗辐射加固器件，包括功率 MOS 管、脉宽调制器、运算放大器等有源器件，如功率 MOS 管，选择采用抗辐射 MOS 器件工艺的半导体器件；

(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<sup>[10]</sup>。

## 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。



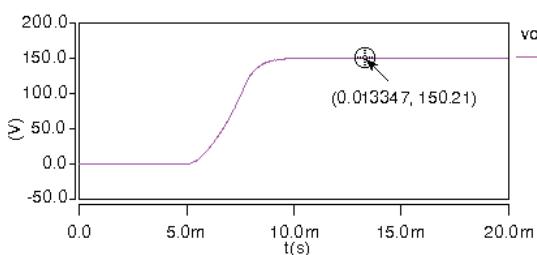


图4 仿真波形图 (PWM 时钟振荡、MOS 栅极驱动、启动电压)

## (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。

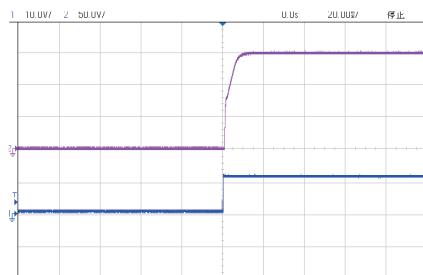


图5 启动电压波形图

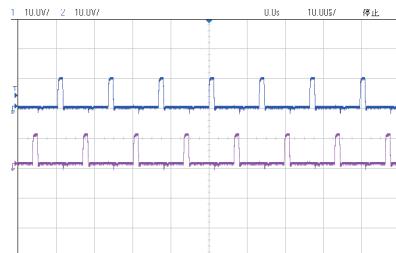


图6 功率开关管栅极电压波形图

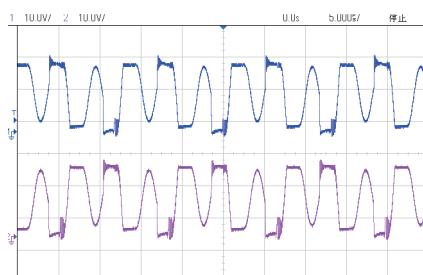


图7 功率开关管漏极电压波形图

## 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 单元的高升压非隔离型 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,颜胥,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.

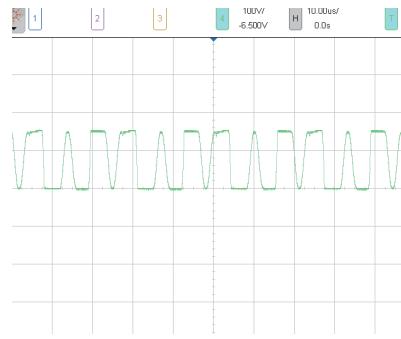


图8 快恢复整流二极管电压波形图

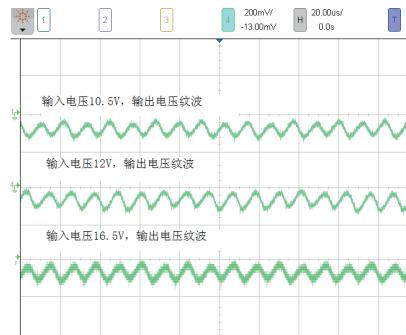


图9 输出纹波电压波形图

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
输出电流	45V ~ 150V 线性可调	45V ~ 150V 线性可调
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。