一种 80 MHz 隔离式 DC-DC 变换器

张　峰，赵　婷，屈　操，马春宇
（中国科学院 自动化研究所，北京 100190）

摘　要： 介绍了一种 80 MHz 隔离式 DC-DC 变换器，无芯 PCB 变压器实现了 VHF 隔离，利用交叉耦合电路和无芯 PCB 变压器形成持续振荡，采用肖特基二极管作为整流器件，电压反馈环路保证整个系统能够稳定输出。采用 FEM 和 EDA 软件实现了无芯 PCB 变压器的设计和整体电路的仿真。测试结果表明，该变换器能够提供 3.3 V 隔离电压输出和 0.3 W 功率输出，效率约为 43%。

关键词： DC-DC 变换器；PCB 变压器；甚高频
中图分类号： TN402　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1004-3365(2017)02-0222-04
DOI:10.13911/j.cnki.1004-3365.2017.02.019

A 80 MHz Isolated DC-DC Converter

ZHANG Feng, ZHAO Ting, QU Cao, MA Chunyu
(*Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *P. R. China*)

Abstract: An isolated DC-DC converter operating at 80 MHz was presented. Very high frequency isolation was provided by a coreless printed circuit board transformer. The cross coupled tank and coreless PCB transformer formed a sustaining oscillation. The Schottky diodes were used as rectification devices. The voltage feedback loop was used to stabilize the output voltage. The design of coreless PCB transformer and the simulation of overall circuit were implemented by the FEM tool and EDA software. Experimental results showed that the output voltage was 3.3 V, the power was 0.3 W, and the converter efficiency was about 43%.

Key words: DC-DC converter; PCB transformer; Very high frequency(VHF)

0　引　言

随着现代电力电子向高频化和高功率密度方向发展，要求功率变换器具有体积小、瞬态响应快、效率和功率密度高等优点[1]。开关频率提升至甚高频（VHF，范围为 30～300 MHz），能够降低电容和电感等无源元件对功率变换器件的储能要求，减小变换器体积和重量，提高功率密度，提升电路的动态性能。但频率提升带来了很多挑战，如开关损耗显著增加、电路寄生参数影响加剧、传统电路拓扑不适用、无源元件性能有待提高等[2-4]。近年来，VHF DC-DC 变换器逐渐成为国内外的研究热点。

2006 年，美国 MIT 的 J. M. Rivas 等人首次提出了 VHF DC-DC 变换器的设计方法[5]，此后又发表了数篇该领域的相关文章；2010 年，J. Burkhart 提出一种基于直接分析法的 VHF Boost 谐振变换器，可以快速实现变换器的优化设计[6]；2011 年，吕亚博、何松柏提出一种 VHF E 类 DC-DC 变换器，利用负载牵引技术对逆变电路与 E 类谐振整流电路进行阻抗匹配，DC-DC 变换器在保持输出功率的前提下达到最大效率[7]；2014 年，M. P. Madsen 等人设计了一种 VHF DE 类 DC-DC 变换器，效率高达 89%[8]。目前，国内外关于 VHF DC-DC 变换器的研究主要以非隔离为主，关于 VHF 隔离式 DC-DC 变换器的研究很少。2014 年，蔡卫等人提出一种 VHF Push-Pull 隔离谐振变换器，实现了功率隔离，扩大了功率范围，但其磁芯变压器在 VHF 引起的损耗降低了系统效率[9]。现已有相关报道指出 PCB 变压器可以实现 VHF 隔离[10,11]。

本文介绍了一种工作频率为 80 MHz 的隔离式 DC-DC 变换器。采用无芯 PCB 变压器实现 VHF 隔离，利用交叉耦合电路和无芯 PCB 变压器形成持续振荡，采用肖特基二极管作为整流器件，电压反馈环路的作用是稳定输出电压。将无芯 PCB 变压器和芯片集成在一个 PCB 板上，通过理论分析和

收稿日期： 2016-03-23；**定稿日期：** 2016-07-04
作者简介： 张　峰（1977－），男，工学硕士，高级工程师，主要从事数字信号隔离、电磁感应方面的研究工作。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

FEM 软件对无芯 PCB 变压器进行设计，采用 EDA 软件对整体电路仿真。经流片测试，该变换器可以提供 3.3 V 的隔离电压输出和 0.3 W 的功率输出，具有体积小、成本低、VHF 隔离的优点。

1　VHF 隔离式 DC-DC 变换器

图 1 所示为本文 VHF 隔离式 DC-DC 变换器的原理框图，包括交叉耦合电路、无芯 PCB 变压器、整流滤波电路、误差放大器、脉宽调制(PWM)控制器和基(门)驱动电路。交叉耦合电路和无芯 PCB 变压器构成 LC 自谐振网络，提供最佳开关频率，控制变压器的输入电流，保证高效传输；无芯 PCB 变压器实现 VHF 隔离和功率传输；采用肖特基二极管作为整流器件；在电压反馈环路中，PWM 控制器将误差放大器的输出与固定频率的三角波进行比较，调制功率管的占空比，进而导通或关断开关管，将能量调节和能量转换分开，维持高效传输，并保证稳压输出。图 2 所示为 VHF 隔离式 DC-DC 变换器主电路拓扑。

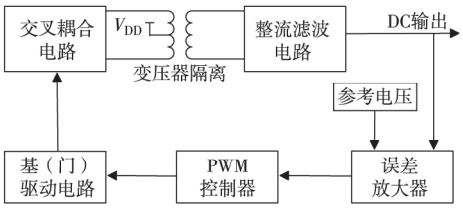


图 1　VHF 隔离式 DC-DC 变换器原理框图

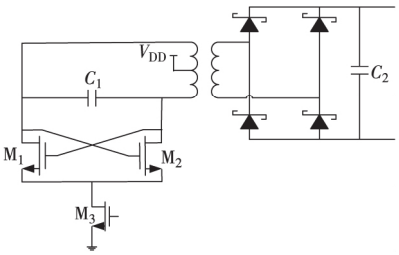
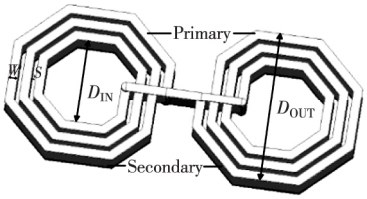


图 2　VHF 隔离式 DC-DC 变换器

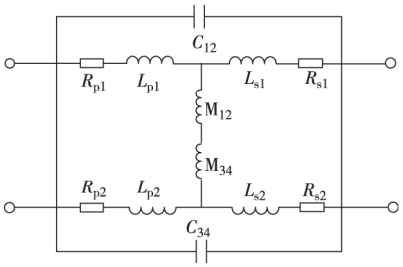
无芯 PCB 变压器的初级线圈采用抽头设计，V_{DD}为电压源。交叉耦合电路的功率管 M_1 和 M_2 的寄生电容 C_1 与变压器初级电感并联，形成 LC 自谐振回路。变压器的副边是由 4 个肖特基二极管和滤波性电容 C_2 构成的整流部分。

1.1　无芯 PCB 变压器的设计

本文的功率变压器采用无芯 PCB 变压器，体积小、功率密度和复制性高。利用 FEM 仿真软件对变压器进行优化设计。变压器初次级线圈结构对称且尺寸参数相同，初级线圈采用中间抽头双端口，次级线圈为单端口。无芯 PCB 变压器的物理模型和等效电路模型如图 3 所示。



(a) 物理模型



(b) 等效电路模型

图 3　无芯 PCB 变压器

无芯 PCB 变压器初次级线圈的匝数为 3，线宽为 0.203 2 mm，线间距为 0.101 6 mm，厚度为 35.56 μm，内径为 1.625 6 mm，外径为 3.251 2 mm，材料为铜。

文献[12]给出了平面螺旋电感的计算公式，有：

$$L=\frac{\mu_0 N^2 D_{AVG} C_1}{2}\times[\ln(C_2/\rho)+C_3\rho+C_4\rho^2] \tag{1}$$

$$\rho=\frac{D_{OUT}-D_{IN}}{D_{OUT}+D_{IN}} \tag{2}$$

$$D_{AVG}=\frac{D_{OUT}+D_{IN}}{2} \tag{3}$$

式中，真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$；N，D_{IN} 和 D_{OUT} 分别为电感的匝数、内径和外径；$C_1=1.07$，$C_2=2.29$，$C_3=0$，$C_4=0.19$。结合(1)～(3)式，得到变压器初次级线圈的电感值均为 28.7 nH。

1.2　交叉耦合振荡器的设计

在分析交叉耦合振荡回路的谐振频率时，无芯 PCB 变压器初次级线圈的串联电阻只影响能量损耗，不影响谐振频率，故可以忽略电阻。交叉耦合振荡器模型如图 4 所示。L_1 和 L_2 分别是初次级线圈的电感，C_1 和 C_2 分别是初次级线圈的总电容，M 是初次级线圈之间的互感。

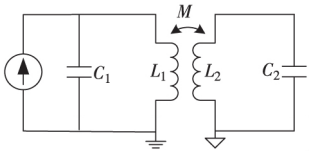


图 4　交叉耦合振荡器模型

设计 LC 自谐振回路时，主要是对谐振电感 L 和谐振电容 C 进行设计。首先应确定 LC 回路的谐振频率。文献[13]中指出，当 L 和 C 谐振在开关频

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

率 f 时，谐振电路效率最高，且传输功率最强，开关频率 $f=1/[2\pi\times(LC)^{1/2}]$。利用本文提出的无芯 PCB 变压器等效电路模型，对开关频率 f 进行推导，可得：

$$f=1/(2\pi((C_{gg}+C_{12})\times((L_{p1}-M_{12})+(L_{s1}-M_{12})\parallel M_{12}+(L_{p2}-M_{34})+(L_{s2}-M_{34})\parallel M_{34}))^{1/2}) \tag{4}$$

式中，C_{gg} 是功率管的寄生电容。为了简化计算，令：$L_{p1}=L_{p2}=L_p$，$L_{s1}=L_{s2}=L_s$，$C_{12}=C_{34}=C$，$M_{12}=M_{34}=M$，故(4)式可写为：

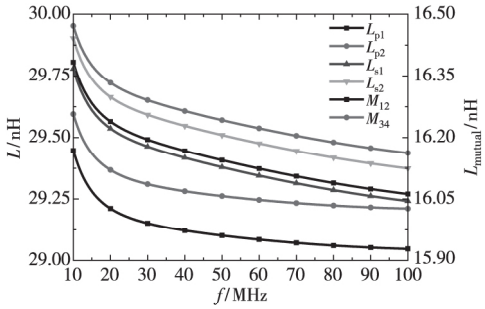
$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{(C_{gg}+C)\times 2((L_p-M)+(L_s-M)\parallel M)}} \tag{5}$$

利用图 3 中的无芯 PCB 变压器仿真模型，得到初次级线圈电感 L_p 和 L_s 均为 29 nH，互感 M 为 16 nH，电容 C 为 148 pF。交叉耦合振荡器的振幅可通过功率管尺寸来调节，故功率管尺寸确定后，得到相应的 C_{gg} 为 60 pF。将上述 L 和 C 的值代入(5)式，得到谐振频率约为 78 MHz。

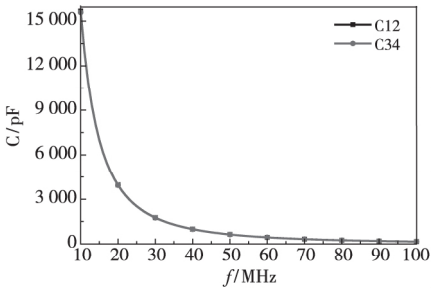
2　仿真与测试分析

2.1　仿真分析

图 5 所示是无芯 PCB 变压器初次级线圈电感、互感和电容的仿真特性曲线。可以得到变压器初次级线圈的电感、互感和电容分别约为 29 nH，16 nH 和 148 pF。上述仿真所得电感值与计算所得电感值的差值较小，表明仿真值与计算值基本吻合。



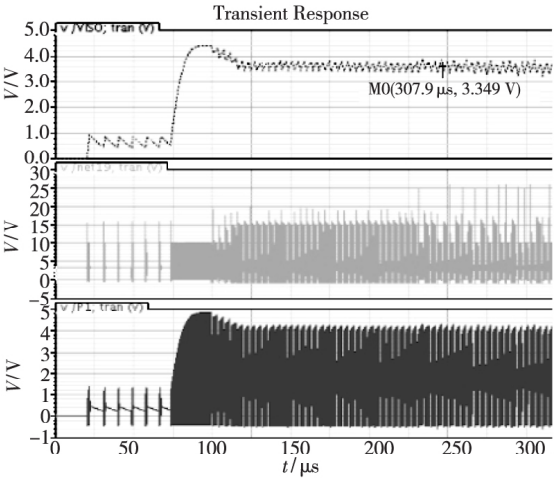
(a) 电感及互感仿真曲线



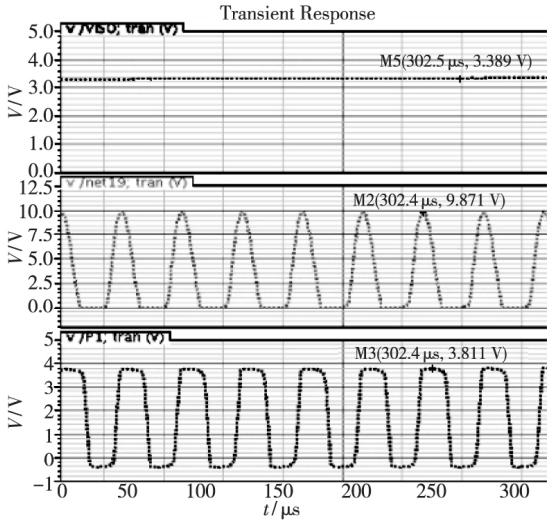
(b) 电容仿真曲线

图 5　变压器初次级线圈

工作频率为 80 MHz，输入电压为 3.3 V 时，对整体电路上电以及电压稳定时得到的仿真波形如图 6 所示，从上至下依次为输出电压波形图、变压器原边输入电压波形图、变压器副边输出电压波形图。



(a) 上电过程的仿真波形



(b) 电压稳定时的仿真波形

图 6　输入电压为 3.3 V 时电路的仿真波形图

电路上电后，交叉耦合振荡电路经过一段时间后开始振荡。因为振荡幅度与电源电压呈正比，当电源电压上升时，振荡幅度逐渐增大，变压器输入电压也随之增大，此时占空比受到系统电压环路带宽的限制来不及变化，输出电压也会上升。随后，当输出电阻分压检测到输出上升，PWM 控制器将误差放大器的输出与固定频率的三角波进行比较，调制功率管的占空比下降，降低系统的输入功率，输出电压下降并稳定在预设电压。

2.2　测试分析

本文 VHF 隔离式 DC-DC 变换器的实物图如图 7 所示。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

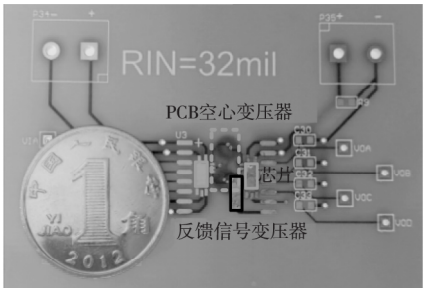


图 7　VHF 隔离式 DC-DC 变换器实物图

利用精密阻抗分析仪对无芯 PCB 变压器的 Z 参数进行测试，将测试结果与 FEM 仿真结果进行比较，如图 8 所示。可以看出，无芯 PCB 变压器的 Z 参数随着频率的增加而增大，仿真结果与测试结果基本吻合，高频略有差异，主要原因在于测试探针存在寄生影响。

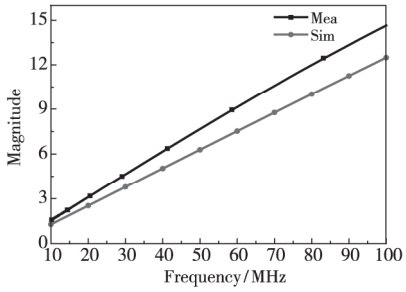


图 8　无芯 PCB 变压器 Z 参数仿真与测试结果

输入电压为 3.3 V 时，不同负载下的输出电压及电流典型值列于表 1。

表 1　不同负载下输出电压及电流

负载电阻/Ω	输入电压/V	输出电压/V	输入电流/mA	输出电流/mA
50	3.3	3.31	160	66.2
33	3.3	3.30	230	100.0
25	3.3	2.92	240	116.84

图 9 所示是输入电压为 3.3 V 时，不同输出电流对应的变换器效率。测试结果表明，本文变换器可以提供 3.3 V 的直流电压输出，输出功率约为 0.3 W；变换器的效率在 43%范围内出现轻微浮动，最高效率可达 43.5%。

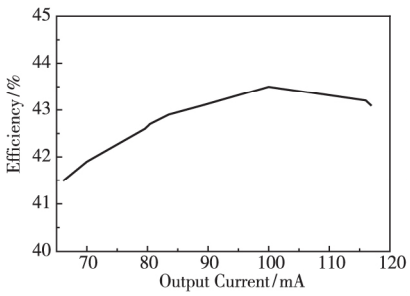


图 9　输入电压为 3.3 V 时变换器的效率

3　结　论

本文设计了一种工作频率为 80 MHz 的隔离式 DC-DC 变换器。通过无芯 PCB 变压器实现 VHF 隔离，利用交叉耦合电路和无芯 PCB 变压器形成持续振荡，采用肖特基二极管作为整流器件，电压反馈环路保证整个系统获得稳定输出。采用 FEM 和 EDA 软件实现了无芯 PCB 变压器的设计以及整体电路的仿真。流片测试结果表明，该变换器可以提供 3.3 V 隔离输出电压和 0.3 W 的输出功率，效率约为 43%，能够满足小功率应用的需求，具有体积小、成本低和 VHF 隔离的优点。现代电力电子要求功率变换器体积日益减小，且效率、功率密度及动态性能不断提高，本文研究对 DC-DC 变换器的研究及工程设计具有重要的借鉴价值。

参 考 文 献：

[1]　RIVAS J M, LEITERMANN O, HAN Y, et al. A very high frequency dc-dc converter based on a class Φ2 resonant inverter[C]// IEEE PESC. Rhodes, Greece. 2008: 1657-1666.

[2]　HU J, SAGNERI A D, RIVAS J M, et al. High-frequency resonant SEPIC converter with wide input and output voltage ranges[J]. IEEE Trans Power Elec, 2012, 27(1): 189-200.

[3]　SAGNERI A D, ANDERSON D I, PERREAULT D J. Optimization of integrated transistors for very high frequency DC-DC converters[J]. IEEE Trans Power Elec, 2013, 28(7): 3614-3626.

[4]　PERREAULT D J, HU J, RIVAS J M, et al. Opportunities and challenges in very high frequency power conversion[C]// Twenty-Fourth Annu IEEE APEC. Washington DC, USA. 2009: 1-14.

[5]　RIVAS J M, JACKSON D, LEITERMANN O, et al. Design considerations for very high frequency dc-dc converters[C]// 37th IEEE PESC. Jeju, Korea. 2006: 1-11.

[6]　BURKHART J. Design of a very high frequency resonant boost DC-DC converter[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2010.

[7]　吕亚博，何松柏. 甚高频(VHF)E 类 DC-DC 变换器的设计[C]// 中国电子学会电路与系统学会第二十三届年会. 桂林，中国. 2011.

（下转第 232 页）

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[3] 王晓萍，甄玲，黄海，等. 压力脉动时间序列的混沌特性与信息熵研究 [J]. 仪器仪表学报，2002，23(6)：596-599

[4] 郭兴明，丁晓蓉，钟丽莎，等. 小波包与混沌集成的心音特征提取及分类识别 [J]. 仪器仪表学报，2012，33(9)：1938-1944.

[5] ALIKHANI A，AHMADI A. A novel current-mode four-quadrant CMOS analog multiplier/divider [J]. AEU-Int J Elec & Commun，2012，66(7)：581-586.

[6] 李志军，胡洪波. 基于 MCCC 的电流模式双二阶滤波器和正交振荡器 [J]. 仪器仪表学报，2010，31(4)：753-757.

[7] 谭志平，曾以成，李志军，等. 浮地型忆阻器混沌电路的分析与实现 [J]. 仪器仪表学报，2014，35(9)：2123-2129.

[8] LUO X H，TU Z W，LIU X R，et al. Implementation of a novel two-attractor grid multi-scroll chaotic system [J]. Chin Phys B，2010，19(7)：127-132.

[9] 杨志民，张洁，马永杰，等. 基于电流传输器的蔡氏混沌电路的设计和实现 [J]. 物理学报，2010，59(5)：3007-3016.

[10] ELWAKIL A S，KENNEDY M P. Improved implementation of Chua's chaotic oscillator using current feedback op amp [J]. IEEE Trans Circ & Syst I：Fundam Theo & Applic，2000，47(1)：76-79.

[11] YALCIN M E，OZOGUZ S，SUYKENS J A K，et al. N-scroll chaos generators：a simple circuit model [J]. Elec Lett，2001，37(3)：147-148.

[12] TREJO G，TLELOCUAUTLE R，E SáNCHEZLóPEZ，et al. Realization of multiscroll chaotic attractors by using current-feedback operational amplifiers [J]. Revista Mexicana De Física，2010，56(4)：268-274.

[13] SáNCHEZ-LóPEZ C，TREJO-GUERRA R，MUÑOZ-PACHECO J M，et al. N-scroll chaotic attractors from saturated function series employing CCII+ s [J]. Nonlinear Dynamics，2010，61(1-2)：331-341.

[14] HUANG Q，WANG C，YAO N，et al. Improving imaging contrast of non-contacted plasmonic lens by off-axis illumination with high numerical aperture [J]. Plasmonics，2014，9(3)：699-706.

[15] MUñOZ-PACHECO J M，TLELO-CUAUTLE E，FLORES-TIRO I E，et al. Experimental synchronization of two integrated multi-scroll chaotic oscillators [J]. J Appl Resear & Technol，2014，12(3)：459-470.

[16] TREJO-GUERRA R，TLELO-CUAUTLE E，CARBAJAL-GóMEZ V H，et al. A survey on the integrated design of chaotic oscillators [J]. Appl Math & Computat，2013，219(10)：5113-5122.

[17] LIN Y，WANG C H，XU H. Grid multi-scroll chaotic attractors in hybrid image encryption algorithm based on current conveyor [J]. Acta Phys Sinica，2012，61(24)：514-518.

[18] MA J，WU X，CHU R，et al. Selection of multi-scroll attractors in Jerk circuits and their verification using Pspice [J]. Nonlinear Dynamics，2014，76(4)：1-12.

[19] 吴先明，何怡刚，于文新. 基于电流反馈放大器的网格多涡卷混沌电路设计与实现 [J]. 物理学报，2014，63(18)：180506-1-180506-6.

[20] 左婷，孙克辉，艾星星，等. 基于同相第二代电流传输器的网格多涡卷混沌电路研究 [J]. 物理学报，2014，63(8)：80501-1-080501-9.

[21] 王春华，尹晋文，林愿. 基于电流传输器的网格多涡卷混沌电路设计与实现 [J]. 物理学报，2012，61(21)：210507-1-210507-8.

[22] TOUMAZOU C，LIDEGY F J，HAIGH D. Analog IC design：the current-mode approach [M]. London：Peter Peregrinus Press，1990：5-10.

[23] 禹思敏. 混沌系统与混沌电路——原理、设计及其在通信中的应用 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2011：245-300.

（上接第 225 页）

[8] MADSEN M P，KNOTT A，ANDERSEN M A E. Very high frequency half bridge DC/DC converter[C] // Twenty-Ninth Annu IEEE APEC. Fort Worth，TX，USA. 2014：1409-1414.

[9] CAI W，ZHANG Z，REN X，et al. A 30-MHz isolated push-pull VHF resonant converter [C] // Twenty-Ninth Annu IEEE APEC. Fort Worth，TX，USA. 2014：1456-1460.

[10] TANG S C，HUI S Y，CHUNG H S H. Coreless planar printed-circuit-board (PCB) transformers-a funfamental concept for signal and energy transfer [J]. IEEE Trans Power Elec，2000，15(5)：931-941.

[11] SEPAHVAND A，ZHANG Y，MAKSIMOVIC D. 100 MHz isolated DC-DC resonant converter using spiral planar PCB transformer [C] // IEEE 16th Workshop COMPEL. Vancouver，BC，USA. 2015：1-8.

[12] ZHAO P J. A new calculation for designing multilayer planar spiral inductors [J]. EDN，2010(14)：37-40.

[13] BOUABANA A，SOURKOUNIS C，MALLACH M. Design and analysis of different structure of a coreless planar transformer for a flyback converter[C] // Int SPEEDAM. Sorrento，Italy. 2012：827-831.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net