

基于无芯 PCB 变压器多路输出隔离 DC-DC 变换器

张 峰, 马春宇, 许洪伟, 赵 婷

(中国科学院 自动化研究所, 北京 100190)

摘 要: 介绍一种多路输出隔离式 DC-DC 变换器, 通过两个串联的层叠结构的无芯 PCB 变压器实现四路一致输出, 利用交叉耦合振荡电路和串联无芯 PCB 变压器初级线圈形成持续振荡回路, 次级线圈经过二极管半桥整流和电容滤波获得直流输出. 通过软件仿真设计无芯 PCB 变压器和整体电路. 测试结果表明, 此变换器能够提供四路 14 V 隔离电压输出. 效率为 45% 时输出功率约为 1.5 W.

关键词: DC-DC 变换器; PCB 变压器; 多路输出

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0123-05

Multiple Output Isolated DC-DC Converter With Coreless PCB Transformers

ZHANG Feng, MA Chun-yu, XU Hong-wei, ZHAO Ting

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A multiple output isolated DC-DC converter with coreless PCB transformer was proposed and demonstrated. The four consistent output voltages were achieved with two series coreless stacked PCB transformer. The cross coupled tank and coreless PCB transformer formed sustaining oscillation. The Schottky diodes were used as rectification devices. The design of the coreless PCB transformer and the overall circuit were implemented by simulation. Experimental results showed that the four output voltages were 14 V. The delivered power was 1.5 W at 45% efficiency.

Key words: DC-DC converter; PCB transformer; multiple outputs

1 引言

多路输出隔离式 DC-DC 变换器广泛应用于航空航天、计算机硬件及电信等领域中, 其发展趋势是体积更小、重量更轻, 它的核心器件之一是多路输出变压器^[1]. 当前使用较多的多路输出变压器是多绕组漆包线变压器^[2], 但这种多绕组变压器体积大, 工作频率低, 参数一致性较差, 难以输出多路一致的电压值^[3]. 而平面无芯 PCB 变压器具有体积小、工作频率高、参数一致性好等优点^[3], 且各层 PCB 板物理特性相同, 层间距离相同^[4], 能够克服传统绕组变压器的缺点, 有望得到多路一致输出电压值. 已有文献报道将无芯 PCB 变压器应用于单输出隔离 DC-DC 变换器中^[5].

本文介绍一种基于无芯 PCB 变压器的四路一致输出隔离式 DC-DC 变换器, 原边功率振荡器利用交叉耦合振荡电路和无芯 PCB 变压器形成持续振荡, 副边经过半桥整流和电容滤波获得直流输出.

2 四路输出隔离式 DC-DC 变换器

图 1 是本文四路一致输出隔离式 DC-DC 变换器的原理框图, 包括交叉耦合振荡电路、无芯 PCB 变压器、整流滤波电路. 交叉耦合振荡电路和无芯 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 变压器实现变压、隔离和功率传输; 整流滤波电路采用肖特基二极管半波整流以及电容滤波.

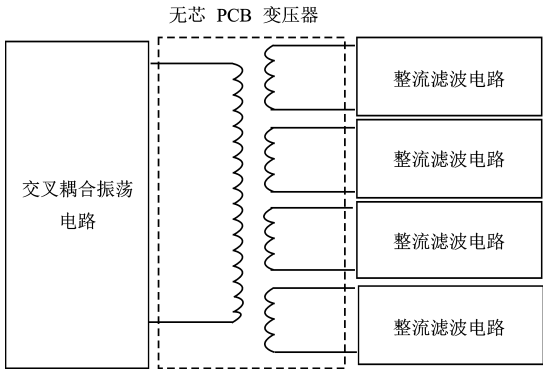


图 1 多路输出隔离式 DC-DC 变换器原理框图

图 2 是多路输出隔离式 DC-DC 变换器电路拓扑,其中 M_1 和 M_2 是两个完全相同的 NMOS 管,并形成交叉耦合振荡电路; V_{in} 是输入直流电源,为 5 V; T_1 、 T_2 是两个完全相同的无芯 PCB 变压器,并且串联; P_a 、 P_b ; S_{1a} – S_{4a} 、 S_{1b} – S_{4b} 分别为变压器 T_1 、 T_2 的初、次级线圈;电容 C_1 为 NMOS 管寄生电容;电容 C_2 为滤波电容; R_L 为负载. T_1 、 T_2 的初级线圈串联后与 C_1 并联,形成 LC 自谐振回路;次级线圈串联后与肖特基二极管构成半波整流部分.

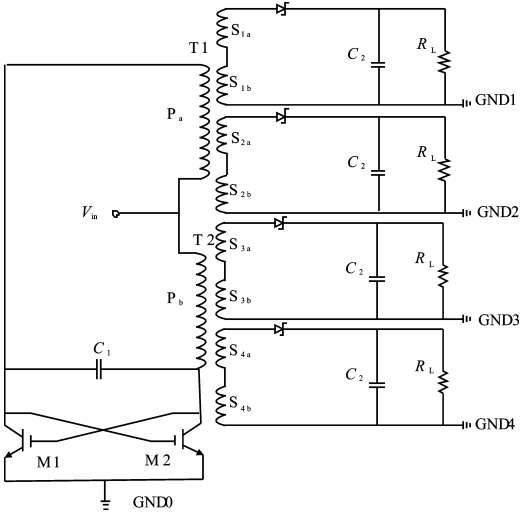
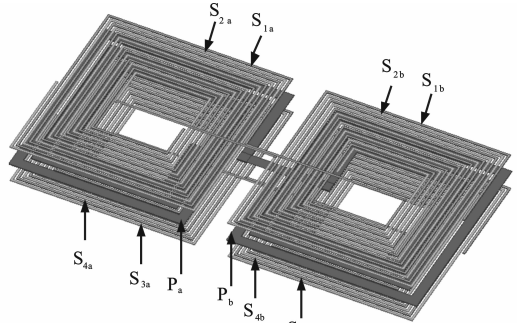


图 2 多路输出隔离式 DC-DC 变换器

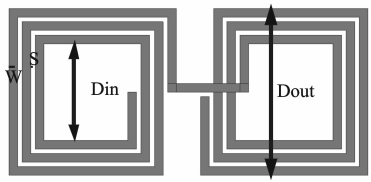
2.1 无芯 PCB 变压器设计

本文变压器采用无芯 PCB 变压器,其体积小、功率密度和复制性高. 串联变压器结构示意图如图 3 所示,每个变压器由 1 个初级线圈,4 个位置对称的、结构完全相同的次级线圈组成,中间层为初级线圈 P ,上层分别是次级线圈 S_1 、 S_2 ; 下层分别是次级线圈 S_3 、 S_4 . 4 个对称的、结构完全相同的次级线圈 (S_1 – S_4) 分布在初级线圈 (p) 上下两层 PCB 板上,每层包括 2 个次级线圈,且 2 个次级线圈采用平面螺

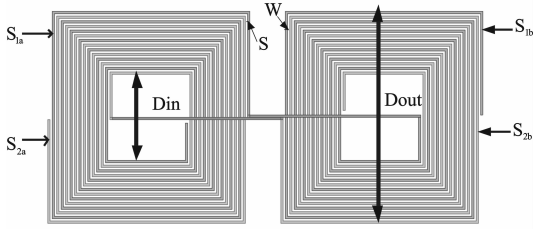
旋交错式结构. 此结构的变压器,既可减小体积,又能保证相同负载时 4 个次级线圈的输出电压相一致.



(a)变压器整体结构图



(b)初级线圈



(c)同层次级线圈

图 3 无芯 PCB 变压器结构图

4 个次级线圈之间相互作用的等效电路图如图 4 所示,跟据此图可以得到 4 个次级线圈输出电压值的表达式如下^[6]:

$$V_m = e_{sn} - R_{sn} * i_{sn} - L_{lksm} * di_{sn}/dt - \sum_{n=1, n \neq m}^4 M_{snsm} * di_{sn}/dt \quad (1)$$

e_{sm} 表示第 m 个次级线圈与原线圈之间的耦合电压值($m = 1, 2, 3$ 或 4);

R_{sm} 表示第 m 个次级线圈的电阻值;

L_{lksm} 表示第 m 个次级线圈相对于初级线圈的漏感;

M_{snsm} 表示第 n 、 m 次级线圈之间的互感($n = 1, 2, 3, 4$ 且 $n \neq m$);

V_m 表示第 m 个次级线圈的输出电压值;

i_{sn} 表示第 m 个次级线圈的电流值;

i_{sn} 表示第 n 个次级线圈的电流值.

4 个次级线圈的几何参数相同,位置对称,同步

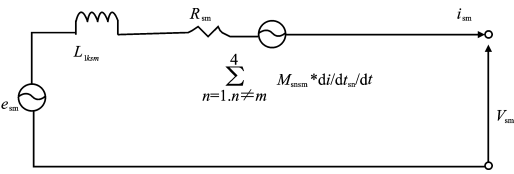


图 4 次级线圈等效电路图

工作时^[6],

$$L_{lks1} = L_{lks2} = L_{lks3} = L_{lks4} \tag{2}$$

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} \tag{3}$$

$$i_{s1} = i_{s2} = i_{s3} = i_{s4} \tag{4}$$

$$e_{s1} = e_{s2} = e_{s3} = e_{s4} \tag{5}$$

由于 4 个次级线圈的几何参数相同且位置对称,依据文献[5]推断次级线圈之间的互感满足:

$$M_{s2s1} = M_{s1s2} = M_{s3s4} = M_{s4s3} \tag{6}$$

$$M_{s1s3} = M_{s3s1} = M_{s2s4} = M_{s4s2} \tag{7}$$

$$M_{s1s4} = M_{s4s1} = M_{s2s3} = M_{s3s2} \tag{8}$$

结合式(1)~(8)可推断

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4.$$

由于 T1、T2 是两个完全相同的变压器,所以只需设计与优化单个变压器. 变压器的设计参数详见表 1,其中变压器初次级线圈的匝数、线宽、线间距、厚度、内径以及外径分别为 N 、 w 、 s 、 t 、 D_{IN} 和 D_{OUT} ,材料为铜. 变压器初、次级电感 L ,电阻 R ,耦合系数 K 详见表 2.

表 1 无芯层叠 PCB 变压器结构参数

参数	初级线圈	次级线圈
N	4	9
$w(\text{mil})$	18	4
$s(\text{mil})$	13	4
$t(\text{mil})$	1.4	1.4
$D_{IN}(\text{mil})$	108	108
$D_{OUT}(\text{mil})$	400	400

2.2 交叉耦合振荡器设计

利用两个串联的变压器和一对 NMOS 管形成 LC 振荡,这种结构可以实现双端差分输出. 为满足振荡器的起振条件,由 NMOS 交叉耦合差分对提供的负阻应足以补偿无芯 PCB 变压器初级线圈串联电阻的损耗,即满足式(9)^[7],文中选用 NMOS 管的 g_m 为 8,而串联无芯 PCB 变压器初级线圈的寄生电阻为 1.72 Ω ,满足要求,振荡器可以起振.

表 2 无芯层叠 PCB 变压器性能参数

参数	变压器
L_p/nH	126
L_{s1}/nH	550
L_{s2}/nH	550
$L_{s3}/\text{nH/}$	550
L_{s4}/nH	550
R_p/Ω	0.43
R_{s1}/Ω	1.9
R_{s2}/Ω	1.9
R_{s3}/Ω	1.9
R_{s4}/Ω	1.9
K_{s1}	0.89
K_{s2}	0.89
K_{s3}	0.89
K_{s4}	0.89

$$\left| -\frac{g_m}{2} \right| \geq \frac{1}{R} \times \alpha \tag{9}$$

g_m 表示 NMOS 管的跨导;
 R 表示串联变压器初级线圈的寄生电阻值;
 α 为安全因子,一般取 2~3.

文献[8]指出,当 L 和 C 谐振在开关频率 f 时,谐振电路效率最高且传输功率最强,开关频率 $f = 1/(2\pi \sqrt{LC})$,本文的谐振频率为 5.7 MHz.

3 仿真与测试分析

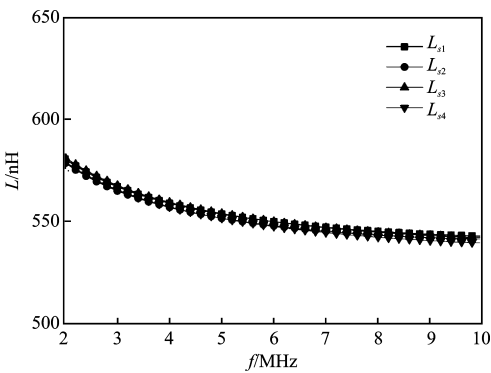
3.1 仿真分析

图 5 是仿真得到的无芯 PCB 变压器次级电感、电阻随频率变化特性曲线. 从图中得到,在 2~10 MHz 范围内,变压器次级线圈的电感值在各个频点均相同,电阻值在 6 MHz 后略有差异,主要是高频寄生影响.

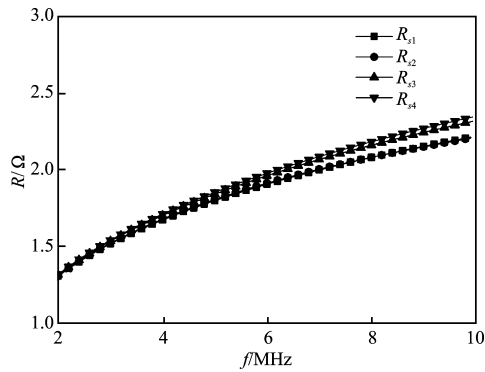
在工作频率为 5.7 MHz,输入电压为 5 V,负载为 580 Ω 时,对整体电路上电至电压稳定时得到仿真波形图,图 6 是仿真得到的串联变压器原边输入电压波形图,从图 6 中可以看到电路上电后,交叉耦合振荡电路经过 0.3 ms 开始振荡,进入稳定状态时幅值与频率不再变化. 图 7 是仿真得到的整流滤波后负载输出电压值. 从图 7 中可以看到整流滤波后输出电压值经过 5 ms 的上升时间达到稳定,此时输出电压值为 16 V.

3.2 测试分析

串联多路输出 PCB 变压器如图 8 所示,每个变



(a)



(b)

图 5 变压器次级线圈电感、电阻随频率变化特性曲线

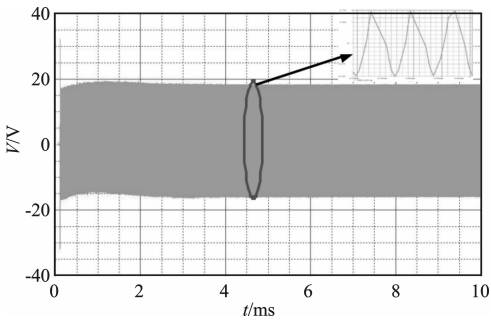


图 6 输入电压 5 V 时串联变压器原边输入电压仿真波形图

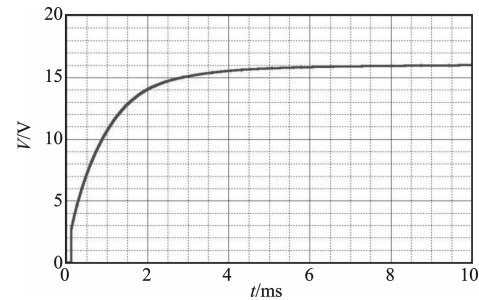


图 7 输入电压 5 V 时整流滤波后负载输出电压仿真波形图

变压器的面积为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 。利用精密阻抗分析仪对无芯 PCB 变压器的 Z 参数测试,测试结果与仿真对

比如图 9 所示。从图中可以看出,变压器的 Z 参数随着频率的增加而增大,仿真和测试结果基本吻合,高频略有差异,主要原因在于测试探针存在寄生影响。

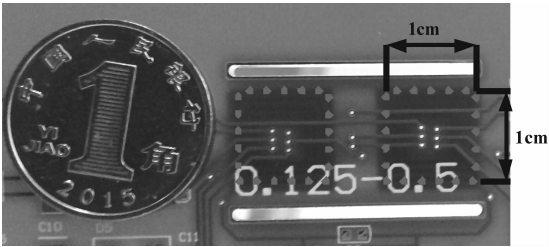


图 8 多路输出串联 PCB 变压器

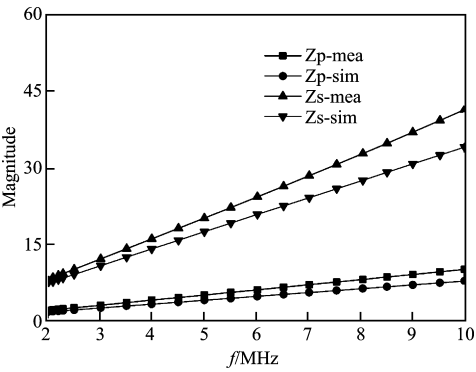


图 9 Z 参数仿真测试对比

表 3 所示为输入电压为 5 V 时,负载电阻为 $580\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 时的输出电压值,从表中可以看到四路输出电压值基本一致。测量值低于仿真值的主要原因是仿真时忽略变压器次级线圈的寄生电阻及漏感影响。

表 3 不同负载下输出电压及功率

负载电 阻/ Ω	输入电 压/V	输入 电 流/A	输出电压/V				功率/ W	效率
			V_1	V_2	V_3	V_4		
580	5	0.65	14.8	14.7	14.5	14.3	1.5	0.45
500	5	0.8	14.9	14.8	14.7	14.4	1.7	0.43

测试结果表明,本文变换器可以提供四路 14 V 的直流电压输出,效率为 45% 时,输出功率约为 1.5 W。

4 结束语

本文研究了一种基于无芯 PCB 变压器的多路输出隔离式 DC-DC 变换器。原边功率振荡器利用交叉耦合振荡电路和变压器初级线圈形成持续振荡回路,副边经过半桥整流和电容滤波得到直流输出。无芯 PCB 变压器通过 4 个位置对称、结构完全相同的次级线圈实现四路一致输出。通过仿真设计变压器以及整体电路。测试结果表明:变换器可以提供四路

14 V 隔离输出电压值,效率为 45%时,输出功率约为 1.5 W,能够满足小功率应用的需求,具有体积小、成本低、结构简单等优点. 现代电子技术要求 DC-DC 变换器体积日益减小,效率高,能够实现多路输出. 本文的探讨结果对多路输出隔离式 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] 赵凤俭,杨玉岗,史晓斌. 平面型 PCB 变压器的设计[J]. 通信电源技术,2005,22(5):15-18.

[2] Nagesha C, Sreedevi A, Gopal M. Simulation and hardware implementation of 24 Watt multiple output flyback converter [C]// Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), 2015 International Conference on. Bangalore, 2015:366-70.

[3] 魏晨,谢运祥,宋静娴. 浅谈开关电源中的平面变压器[J]. 通信电源技术,2006,23(5):55-61.

[4] 宋晓冬,王志强. 论平面变压器在开关电源中的技术优势[J]. 电源世界,2007,10(9):34-37.

[5] Kotte H B, Ambatipudi A, Bertilsson K. High-speed (MHz) series resonant converter (SRC) using multi-layered coreless printed circuit board (PCB) step-down power transformer[J]. IEEE, Electronics, 2013, 28 (3):1253-1264.

[6] Tang S C, Hui S Y R , Chung H. Coreless PCB transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits[C]// Power Electronics Specialists Conference (PESC), 1998 International Conference on. Fukuoka, 1998: 1965-1971.

[7] 陈超. CMOS 压控振荡器的研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.

[8] Bouabana A, Sourkounis C, Mallach M. Design and analysis of different structure of a coreless planar transformer for a flyback converter[C]// Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on. Sorrento, 2012:827-831.

作者简介:

张 峰 男,(1977-),硕士,高级工程师. 研究方向为数字信号隔离、智能弹药装定技术、磁隔离技术.

马春宇(通讯作者) 女,(1986-),硕士,工程师. 研究方向为集成电路设计、电磁理论及仿真.
E-mail:chunyu. ma@ia. ac. cn.

许洪伟 男,(1987-),学士,工程师. 研究方向为射频集成电路设计.

赵 婷 女,(1989-),硕士,助理工程师. 研究方向为射频集成电路、电磁理论及仿真.

(上接第 122 页)

[9] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particles swarm theory [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya: IEEE Inc, 1995:39-43.

[10] 文丽,吴量大. 高等数学[M]. 北京:北京大学出版社,1989:48-59.

[11] 彭智,谢玲. 混合优化算法的全局收敛性分析[J]. 北京理工大学学报,2012,4(32):435-440.

[12] 郭红戈. 思维进化算法的转移概率分析及几乎处处收敛性证明[J]. 控制与决策,2014,12(29):2201-2206.

作者简介:

李志华 女,(1978-),副教授,硕士生导师. 研究方向为无线传感器网络、煤矿信息化.

许 新(通讯作者) 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为数据融合、煤矿信息化. E-mail: 15930900313@163. com.

黎作鹏 男,(1985-),博士,讲师. 研究方向为无线传感器网络、物联网技术.

任丹萍 女,(1984-),博士,讲师. 研究方向为宽带通信网、煤矿信息化.