

一种大功率厚膜混合集成 DC/DC 变换器设计

高东辉^{1,2}, 袁宝山^{1,2}, 蔡可红^{1,2}, 黄煜炜¹

(1. 中国电子科技集团公司第四十三研究所, 安徽 合肥 230088;

2. 中国电子科技集团公司第四十三研究所 微系统安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要:现有厚膜混合集成 DC/DC 变换器的最大输出功率仅为 150 W, 针对输出功率无法满足工程使用需求的问题, 开展大功率厚膜混合集成 DC/DC 变换器技术研究。采用带次级同步整流的移相全桥拓扑结构, 详细阐述了反馈控制电路、磁隔离驱动电路、同步整流控制电路等设计关键点的实现方式。研制了一款 500 W 厚膜混合集成 DC/DC 变换器试验样机, 将厚膜混合集成 DC/DC 变换器的最大输出功率由 150 W 提升至 500 W, 最高功率密度由 100 W/in³ 提升至 167 W/in³, 试验结果验证了整体方案的可行性。

关键词:厚膜混合集成; DC/DC 变换器; 移相全桥; 同步整流; 磁隔离

中图分类号: TN45; TN86 文献标志码: A 文章编号: 1673-5692(2023)05-429-09

Design of a High Power Thick Film Hybrid Integrated DC/DC Converter

GAO Dong-hui^{1,2}, YUAN Bao-shan^{1,2}, CAI Ke-hong^{1,2}, HUANG Yu-wei¹

(1. The 43rd Research Institute of CETC, Hefei 230088, China;

2. The 43rd Research Institute of CETC Anhui Province Key Laboratory of Microsystem, Hefei 230088, China)

Abstract: The maximum output power of existing hybrid integrated DC/DC converters is only 150 W, in order to solve the problem that the output power can not meet the needs of engineering applications, the research on high-power thick film hybrid integrated DC/DC converter technology was carried out. Based on the phase-shifting full-bridge topology with secondary synchronous rectifier, the realization methods of feedback control circuit, magnetic isolation drive circuit, synchronous rectifier control circuit and other key points are described in detail. A 500 W thick film hybrid integrated DC/DC converter is developed, the maximum output power is increased from 150 W to 500 W, the maximum power density is increased from 100 W/in³ to 167 W/in³, the experimental results verify the feasibility of the whole scheme.

Key words: thick film hybrid integration; DC/DC converter; phase shift full bridge; synchronous rectifier; magnetic isolation

0 引言

厚膜混合集成 DC/DC 变换器基于厚膜成膜、裸芯片粘接/焊接、金丝/铝丝键合等厚膜混合集成工艺^[1-2], 采用金属全密封封装结构, 与工业用印刷电

路板(Printed Circuit Board, PCB)制作的 DC/DC 变换器相比, 具有高质量等级(H 级)、宽工作温度范围(-55℃~+125℃)、强环境适应性、高可靠性等特点, 广泛应用于航空、航天、兵器、船舶等高可靠领域^[3-5]。典型内部结构和典型产品分别如图 1 和图 2 所示。

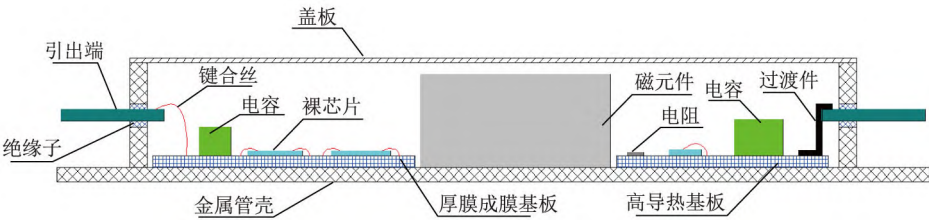


图 1 厚膜混合集成 DC/DC 变换器内部结构



图 2 国外 120 W 厚膜混合集成大功率 DC/DC 变换器产品

随着单机系统功能和载荷的不断增加,对大功率 DC/DC 变换器的需求量与日俱增。目前来看,大

功率 DC/DC 变换器通常采用 PCB 工艺,以美国 Vicor 公司为例,其研制的 DCM 系列 DC/DC 变换器最高功率密度达到了 $1\,244\text{ W/in}^3$,为业界标杆水平。DC/DC 变换器实现高功率密度和高转换效率依赖于高频软开关技术^[6-7]和先进的封装工艺。目前大功率 DC/DC 变换器多采用全塑封工艺,不具备气密性,在质量等级和工作温度范围等方面均与混合集成 DC/DC 变换器存在一定差距,使用范围受限。

在厚膜大功率电源领域,欧美起步较早,目前应用最为广泛的主要有美国 Interpoint 公司、VPT 公司、IR 公司等大功率电源系列产品,输出功率均在 $66\text{ W}\sim 120\text{ W}$,产品特点总结如表 1 所示^[8-10]。

表 1 国外厚膜大功率电源特点

特性	Interpoint	VPT	IR	IR	IR	IR
系列名称	MOR28	DVFL28	AFL28	AFL50	AFL120	AFL270
输入电压/V	16~40	16~40	16~40	30~80	80~160	160~400
标称输入电压/V	28	28	28	50	120	270
输出功率/W	66~120	66~120	80~120	80~120	80~120	80~120
最大输出电流/A	20	20	16	16	16	16
拓扑结构	单端正激+肖特基整流	单端正激+肖特基整流	单端正激+肖特基整流	单端正激+肖特基整流	双管正激+肖特基整流	双管正激+肖特基整流
最大功率密度/($\text{W}\cdot\text{in}^{-3}$)	80	80	84	84	84	84
隔离反馈方式			磁隔离反馈			
采用工艺			厚膜混合集成工艺			
封装结构			金属全密封封装			
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$			$-55\sim 125$			

国内厚膜电源的研制起步于二十世纪八十年代,目前已形成较为完整的混合集成电路科研和生产能力,相关厂家于 2010 年左右开始研制厚膜大功率电源产品,产品特点总结如表 2 所示。

对比表 1 和表 2 可见,国内外低压输入厚膜大功率电源整体技术水平相当,但在高压输入领域,国外已形成系列产品,国内尚处于起步阶段,未见系列产品推出。

近年来,随着电子装备系统的快速发展,越来越多厂家提出了 300 W 以上厚膜电源的应用需求,现有厚膜混合集成 DC/DC 变换器在输入电压等级、输出功率等方面已无法满足需求,亟需开展高压输入、大功率输出厚膜混合集成 DC/DC 变换器的研制工作。

针对实际应用需求,本文开展 270 V 高压输入,500 W 输出厚膜混合集成 DC/DC 变换器研究,首次

表 2 国内厚膜大功率电源特点

特性	指标
输入电压/V	16~40、80~120
标称输入电压/V	28
输出功率/W	66~150
最大输出电流/A	24
拓扑结构	单端正激/半桥+肖特基整流/ 同步整流
最大功率密度/(W·in ⁻³)	100
隔离反馈方式	光耦隔离/磁隔离
采用工艺	厚膜混合集成工艺
封装结构	金属全密封封装
工作温度/℃	-55~125

将移相全桥软开关拓扑结构应用于厚膜混合集成电源领域,将厚膜混合集成 DC/DC 变换器的最大输出功率由 150 W 提升至 500 W,最高功率密度由 100 W/in³ 提升至 167 W/in³。

1 关键技术分析

本文的研制目标与现有厚膜混合集成 DC/DC 变换器相比,优势主要为:输入电压等级高、输出功率大、转换效率高、产品功率密度高。

1.1 电路关键技术

1) 电路拓扑结构选择

国内外现有成熟的厚膜混合集成 DC/DC 变换器最大输出功率仅为 150 W,目前采用单端正激、半桥、双管正激等适用于中小功率输出的主电路拓扑结构,无法满足本项目 500 W 的输出功率要求。且上述拓扑结构均工作于硬开关工作状态,在高压输入时,开关损耗较大,转换效率低,无法满足本项目的高转换效率要求。

高压输入时,功率开关管损耗中的导通损耗占比较小,开通损耗和关断损耗占主导地位,因而适合采用软开关拓扑结构来实现功率开关管的零电压或零电流工作以降低开关损耗,从而达到提升转换效率的目的。

本项目采用移相全桥软开关拓扑结构,该拓扑结构因为具有控制简单、能够实现原边开关管的 ZVS、磁芯利用率高、电压电流应力小等特点而广泛应用在中大功率场合。为满足本项目的高转换效率要求,输出侧整流电路采用同步整流结构^[11-12]。

目前国内外厚膜电源中尚未有采用“移相全桥+同步整流”拓扑结构的产品推出,本项目属该电路在厚膜电源产品中的首次应用。

2) 桥式磁隔离驱动设计

磁隔离驱动由于具备可靠性高,温度稳定性好、使用寿命长等优点而被广泛应用于航空航天电源的设计中。

针对桥式电路,桥臂上管需采用浮地驱动,本项目采用国产的双通道磁隔离驱动器来实现桥式磁隔离驱动功能。

对于 PCB 板级电源来说,采用的双通道磁隔离驱动器为成品封装器件,电性能已经过芯片厂家充分验证。而本项目内部电路采用裸芯片组装工艺,电气互连采用金丝键合,双通道磁隔离驱动器共包含 3 颗裸芯片,采用裸芯片组装互连来实现该功能属在厚膜电源产品中的首次应用,对厚膜版图布局的要求极高。

3) 次级同步整流管电压尖峰抑制

在实际工作中,由于输出整流电路中的同步整流管的结电容会与变压器的漏感和外加谐振电感产生谐振,从而导致输出同步整流管上存在电压振荡和电压尖峰,增大了其电压应力,为了保证 DC/DC 变换器的可靠性,降低输出同步整流管上的电压应力,需增加额外的电路来抑制电压尖峰。结合移相全桥电路的工作特点,本文采用 Tr-Lag 型钳位二极管电路来抑制次级同步整流管的电压尖峰^[13]。

4) 次级同步整流轻载管理

输出侧采用同步整流技术可以提高电源重载时的转换效率,但是在输出轻载时同步整流管开通会导致电感电流反向,反向电流过大会在同步整流管的漏源极两端产生电压尖峰,严重时会导致同步整流管烧毁。

目前国外的移相全桥控制器如 TI 公司的 UCC 28950 具有轻载管理功能,通过 DCM 引脚即可实现轻载关同步整流的设计。

而目前国产的移相全桥脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)控制器不具备轻载管理功能,本项目针对该缺点额外设计了同步整流控制电路,通过检测 DC/DC 变换器的输出电流,实现在重载时开同步整流,轻载时关同步整流的功能。

1.2 工艺关键技术

该产品的研制目标为厚膜混合集成电源,功率密度较现有产品需有较大提升,具体工艺实施路径

如下。

(1) 采用金属全密封外壳封装, 大电流引出端采用直径为 1 mm 的无氧铜引针包封陶瓷绝缘子封接在金属外壳上, 输出大电流引脚采用双引脚并联, 采用平行缝焊工艺密封, 壳体材料拟采用 10# 钢材质, 导热性能良好。

(2) 输入、输出功率基板采用 AMB 覆铜基板, 在具备高导热性的同时采用表面覆铜工艺可最大限度减小线路通流阻抗, 提升转换效率。

(3) 信号基板采用 Al_2O_3 陶瓷基板, 采用多层布线技术、0402 小尺寸阻容等最大限度减小占板面积, 提高功率密度。

(4) 内部所有有源器件如 MOS 管、PWM 控制器、运算放大器、二极管、三极管、稳压管等均采用裸芯片焊接或粘接工艺, 通过铝丝或金丝键合实现电气互连。

(5) 输出大电流通道采用高可靠的过渡互连结构。

(6) 主功率变压器和电感直接通过导热胶粘接在管壳上进行散热, 变压器和电感的引出端通过高可靠过渡互连结构与功率基板互连。

2 电路方案

采用“移相全桥+同步整流”拓扑结构的整体电路原理框图如图 3 所示。移相全桥 PWM 控制器置于次级侧, DC/DC 变换器的输出电压经电压采样电路后经误差放大器送入移相全桥 PWM 控制器, 产生 OUTA~OUTD 四路 PWM 信号, 通过隔离式双通道栅极驱动器后驱动初级桥式开关管, OUTC 和 OUTD 通过双通道 MOS 驱动器后驱动次级同步整流管。同步整流开关控制电路通过检测输出电流来实现轻载关同步整流的功能, 隔离辅助电源为初次级控制电路和驱动电路提供供电电压。

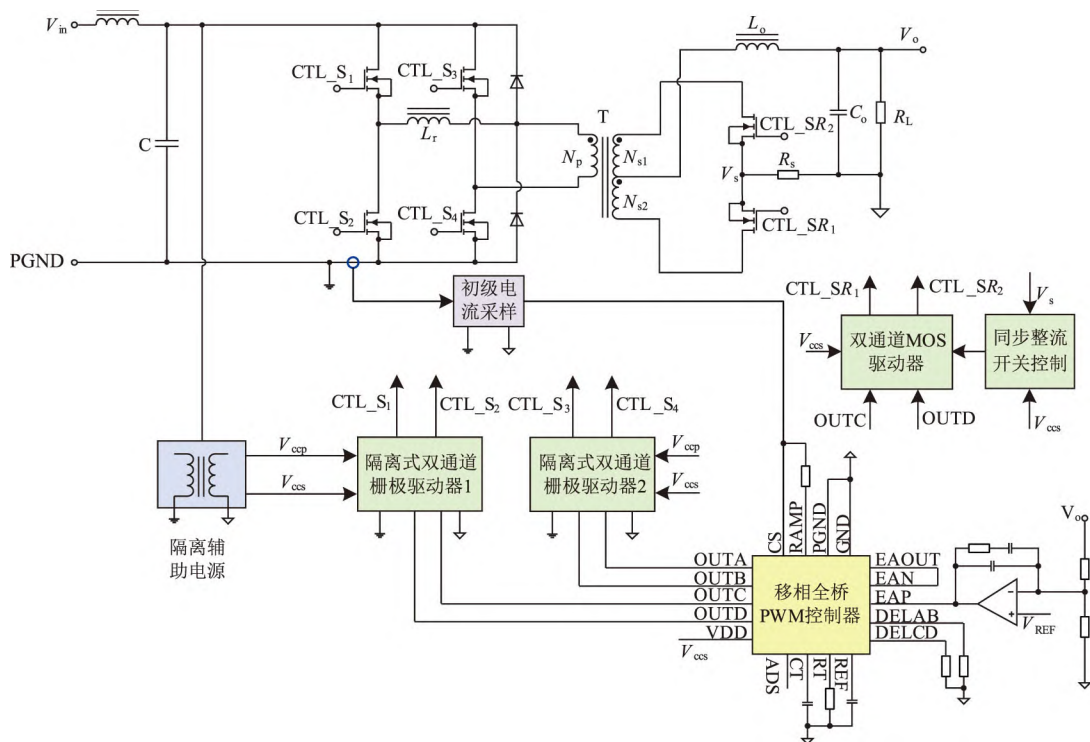


图 3 电路原理框图

区别于 PCB 板级电源, 本文采用厚膜混合集成工艺, 内部的有源器件如功率开关管、PWM 控制器、运算放大器、MOS 驱动器、二极管、三极管等均使用裸芯片, 通过金丝/铝丝键合实现电气互连, 关键元器件选型遵循两条原则, 即: 优先选用国产元器件; 裸芯片供货渠道畅通可获得。根据本文的研制目标要求, 通过电路参数设计, 确定关键元器件裸芯片选型来满足参数要求。

3 控制电路设计

由图 3 可见, 控制电路主要包括基于移相全桥 PWM 控制器设计的反馈控制电路、基于隔离式双通道栅极驱动器设计的磁隔离驱动电路、基于双通道 MOS 驱动器设计的同步整流驱动及开关控制电路三部分。

3.1 反馈控制电路

基于国产移相全桥 PWM 控制器 N_1 构成的反馈控制电路如图 4 所示,国产移相全桥 PWM 控制

器的功能对标美国 TI 公司的 UCC1895L。采用恒压-恒流双环控制模式,其中运放 N_2 为电压环反馈控制误差放大器,运放 N_3 为电流环反馈控制误差放大器。

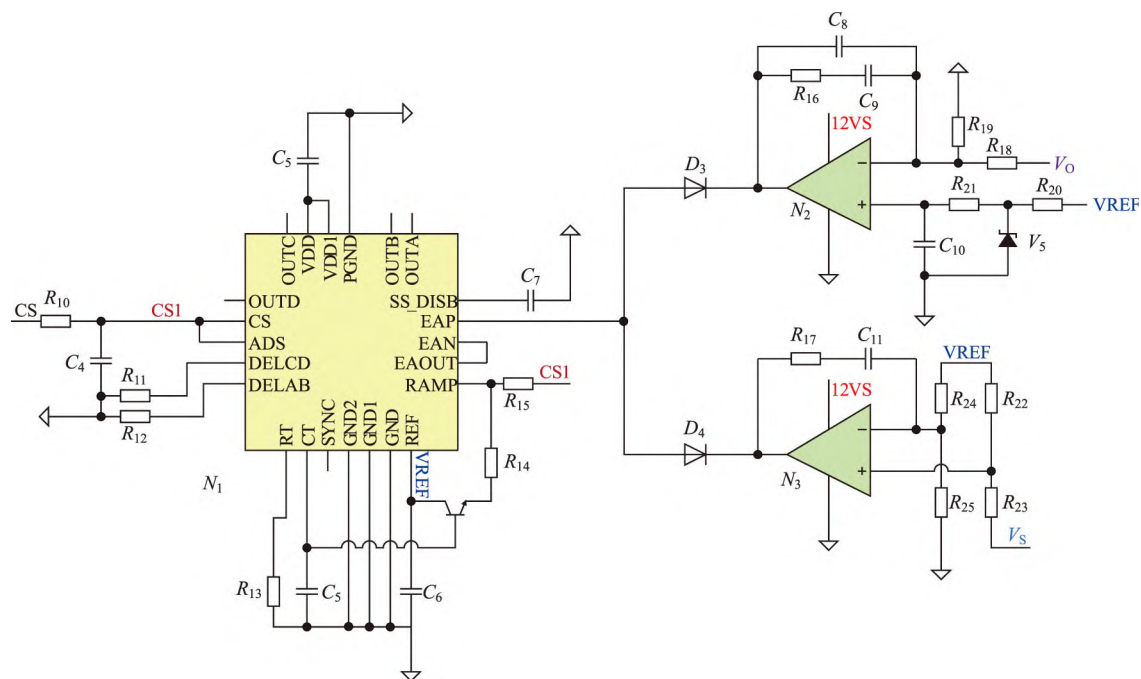


图 4 反馈控制电路

正常工作时,输出电压 V_O 通过误差放大器 N_2 形成闭环反馈,输出电压跟随电压基准 $VREF$ 电压保持稳定,DC/DC 变换器工作于恒压模式,由于此时输出电流未达到限流值, N_3 输出为高电平,二极管 D_3 导通, D_4 截止;当输出电流达到限流值时, N_3 输出由高电平变为低电平,此时二极管 D_3 截止, D_4 导通,输出电流采样得到的电压信号 V_s 通过误差放大器 N_3 形成闭环反馈,输出电流跟随基准电压保持稳定,DC/DC 变换器工作于恒流模式。

3.2 磁隔离驱动电路

选用国产的双通道隔离驱动器裸芯片 N_4 、 N_5 、 N_6 ,基于国产双通道隔离驱动器构成的磁隔离驱动电路如图 5 所示。

DC/DC 变换器的次级供电 12VS 为芯片 N_4 提供供电电压,图 4 中 N_1 输出的 PWM 信号 INA 和 INB 作为 N_4 的输入信号,死区时间设置引脚 DT 通过高阻接 12VS,禁用 N_4 的死区时间调节功能,上下管之间的死区时间通过移相全桥 PWM 控制器 N_1 来进行设置。

对于上管 V_1 而言,由图中的 R_2 、 D_1 和 C_2 构成

自举供电电路, N_5 的参考平面接开关管中点构成浮地驱动。对于下管 V_2 而言,初级供电 12VP 直接为 N_6 提供供电, N_6 的参考平面接初级地。

3.3 同步整流控制电路

由于图 4 中 N_1 不带次级同步整流驱动功能,因而需要单独设计次级同步整流控制电路,移相全桥主功率电路如图 3 所示,次级同步整流驱动时序与初级移相全桥的驱动时序通常有 2 种,如图 6 所示。

图 6 中左侧的次级同步整流驱动时序为初级移相驱动时序“或”得到,即:CTL_SR₁ 为 CTL_S₁ 和 CTL_S₄“或”,CTL_SR₂ 为 CTL_S₂ 和 CTL_S₃“或”。

图 6 中右侧的同步整流驱动时序为:CTL_SR₁ 与 CTL_S₄ 一致,CTL_SR₂ 与 CTL_S₃ 一致。

相比较而言,右侧的同步整流驱动时序更为简单,无需额外的“或”门来实现时序控制,但相比于左侧的驱动时序而言,次级同步整流管导通的时间更短,在换流期间,次级同步整流管未导通,通过次级肖特基二极管实现换流,故效率相比于左侧而言要低一些。综合考虑电路复杂度、元器件成本、版图

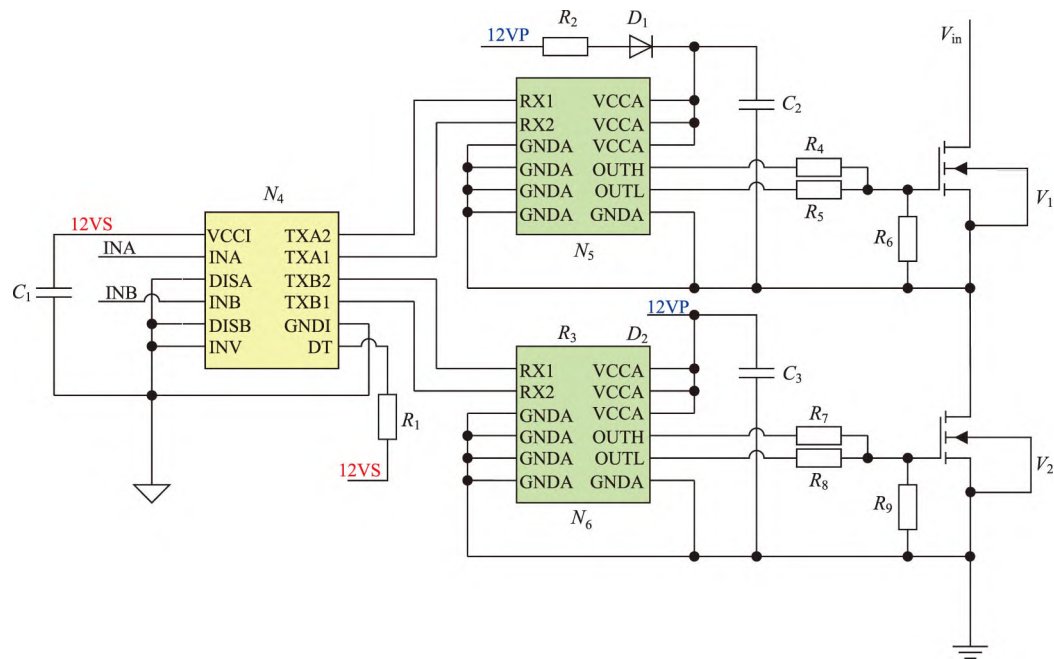


图 5 磁隔离驱动电路

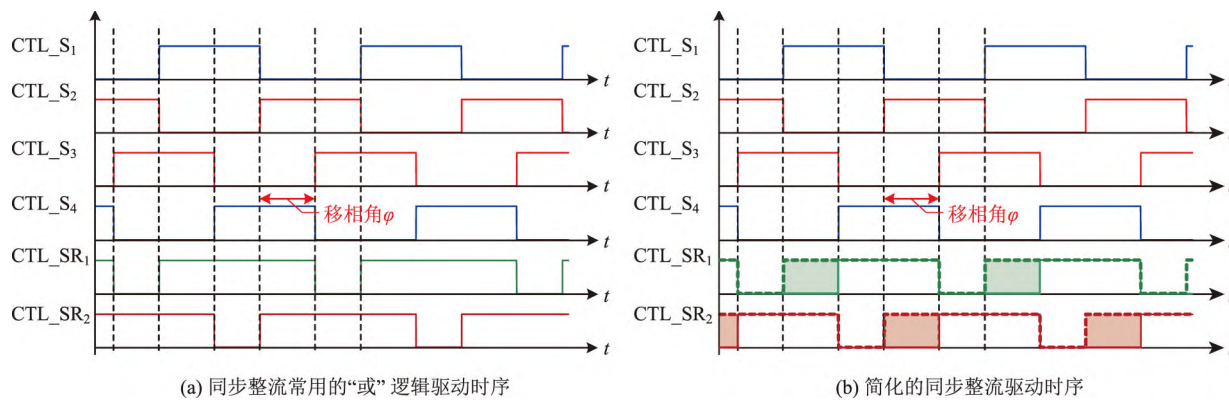


图 6 2 种常用的驱动时序

复杂度、效率等因素,在本项目中采用更为简单的同步整流时序控制,如图 6(b) 的驱动时序所示。

另外,需增加额外的电流检测电路以实现轻载关同步整流的功能,具体电路实现方案如图 7 所示。

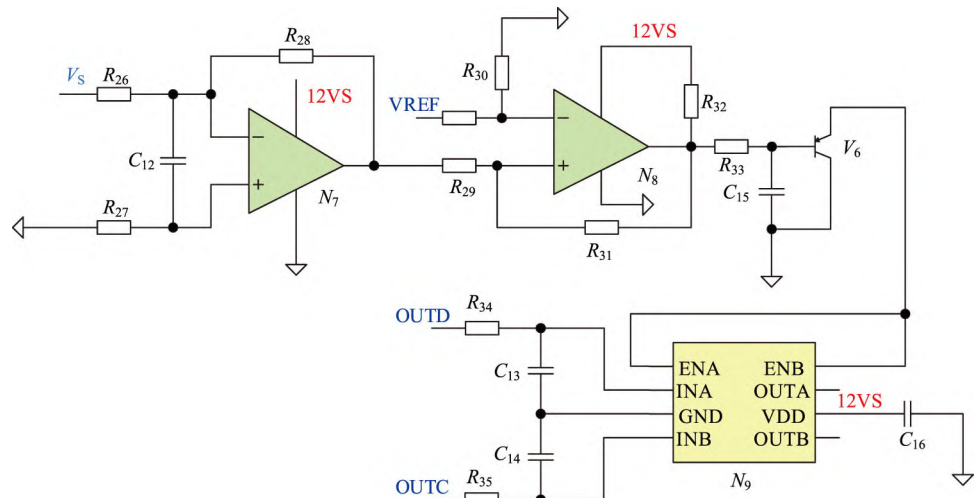


图 7 同步整流开关控制电路

输出电流经采样电阻 R_s 得到采样电压 V_s , 采样电压送入运放 N_7 中进行放大, 放大得到的电压送入比较器 N_8 中, 与基准电压做比较, 当低于基准电压时, N_8 输出为低, 此时 MOS 驱动器 N_9 的使能端 ENA 和 ENB 被拉低, 同步整流关闭; 当高于基准电压时, N_8 输出为高, 此时 MOS 驱动器 N_9 的使能端 ENA 和 ENB 置高, 同步整流开启。通过上述电路即实现了轻载关同步整流的功能。

4 实验验证

为验证电路设计的正确性与厚膜工艺实施途径的可行性, 研制了一台输入 270 V, 输出 500 W, 28 V/17.86 A 的厚膜电源样机, 如图 8 所示, 样机尺寸为 77.30 mm×50.00 mm×12.70 mm。



图 8 500 W 厚膜电源样机

4.1 静态特性

样机的主要静态特性测试结果如表 3 所示。

表 3 主要静态特性测试结果

参数	测试条件	测试结果
效率/%	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	94.2
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	93.7
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=125\text{ }^{\circ}\text{C}$	92.4
输出纹波电压/mV	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	208
电压调整度/ mV	$V_{in}=240\text{ V}\rightarrow 300\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	4
	$V_{in}=240\text{ V}\rightarrow 300\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	8
	$V_{in}=240\text{ V}\rightarrow 300\text{ V}, I_o=17.86\text{ A}, T_c=125\text{ }^{\circ}\text{C}$	11
负载调整度/ mV	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}\rightarrow 17.86\text{ A}, T_c=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	2
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}\rightarrow 17.86\text{ A}, T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	3
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}\rightarrow 17.86\text{ A}, T_c=125\text{ }^{\circ}\text{C}$	7
空载输入电流/mA	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}, T_c=-55\text{ }^{\circ}\text{C}$	78
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}, T_c=25\text{ }^{\circ}\text{C}$	75
	$V_{in}=270\text{ V}, I_o=0\text{ A}, T_c=125\text{ }^{\circ}\text{C}$	70

由表 3 可见, 样机转换效率最高达 94.2%, 且在宽工作温度范围内具有良好的电压精度。样机在不同输入电压和输出功率工作条件下的效率曲线如图 9 所示, 可见样机具备良好的静态特性。

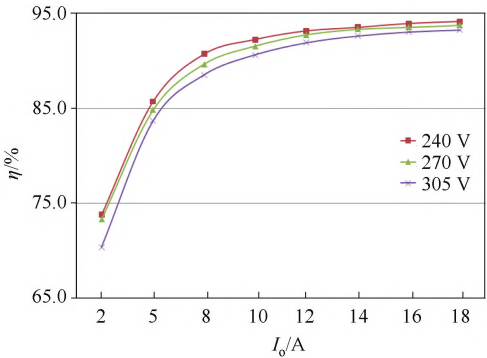


图 9 样机效率曲线

4.2 动态特性

样机的关键动态波形测试结果如图 10 所示。图 10 中 V_{AB} 为超前桥臂中点和滞后桥臂中点差分电压波形, V_o 为输出电压波形, V_{ds} 为次级同步整流管漏源极电压波形。图 10(a) 为 270 V 输入时, 样机满载启动波形, 满载启动时输出电压单调上升, V_{AB} 和 V_o 均无电压尖峰; 图 10(b) 为 270 V 输入时, 样机满载关断波形, 满载关断时输出电压单调下降, V_{AB} 和 V_o 均无电压尖峰; 图 10(c) 和图 10(d) 为 270 V 输入时, 样机负载跃变波形, 输出电压跃变幅值约为 1.24 V, 恢复时间约为 400 μs , 可见样机具有良好的动态响应特性。

4.3 高温热分布特性

为了进一步验证试验样机高温运行的可靠性, 对样机进行热分布试验, 试验条件为 270 V 输入, 500 W 输出, 控制产品管壳温度为 125 $^{\circ}\text{C}$ 时, 产品达到热平衡后的热分布结果如图 11 所示。

由图 11 可见, 在壳温为 125 $^{\circ}\text{C}$ 时, 初级功率开关管工作温度为 118 $^{\circ}\text{C}$, 次级同步整流管的工作温度为 109 $^{\circ}\text{C}$, 均小于结温 150 $^{\circ}\text{C}$; 样机内部温升最高的元器件为主功率变压器, 温升达 35 $^{\circ}\text{C}$, 变压器最高工作温度为 160 $^{\circ}\text{C}$, 远小于 TPW33 磁芯的居里温度 220 $^{\circ}\text{C}$ 。试验样机在壳温为 125 $^{\circ}\text{C}$ 时可以稳定工作。

4.4 样机指标先进性分析

本文与目前国内外大功率厚膜混合集成 DC/

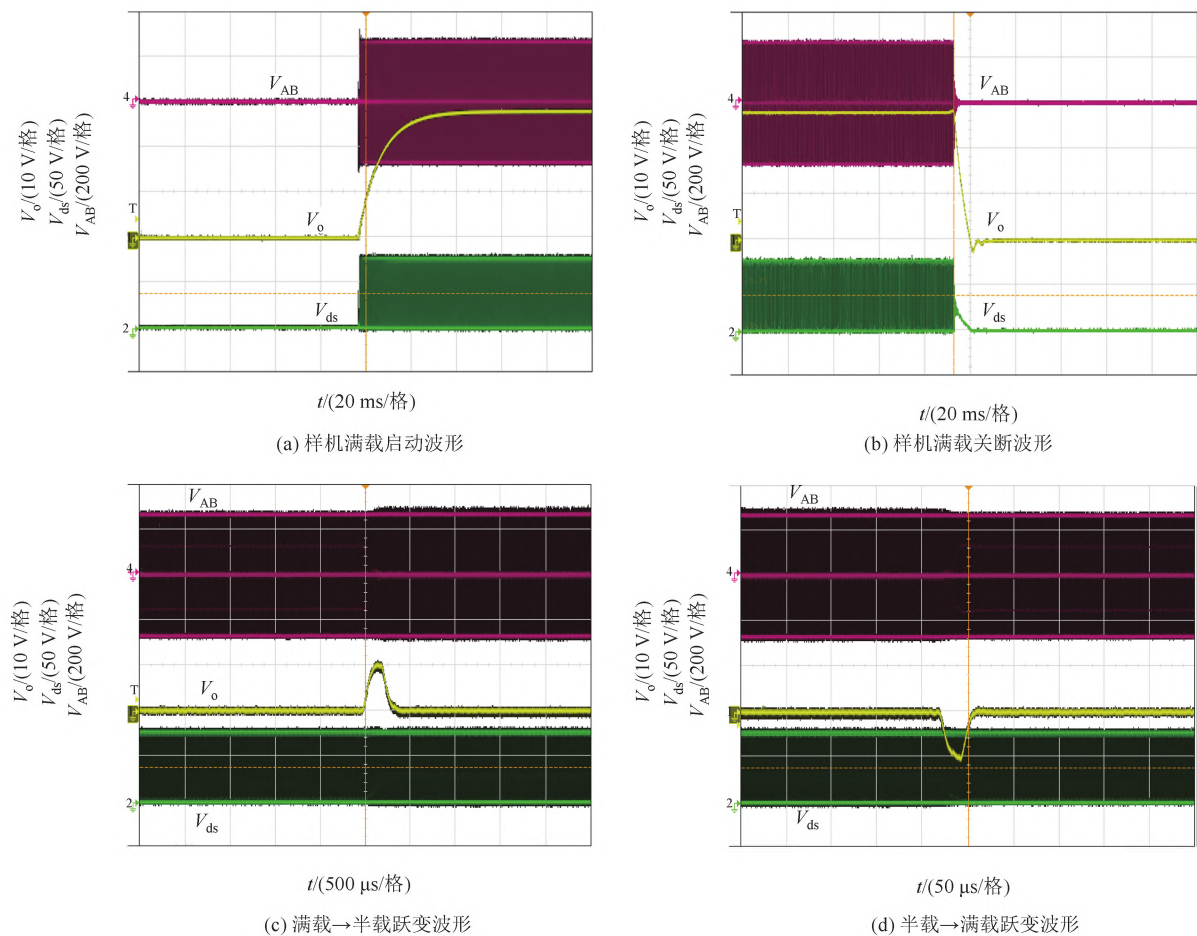


图 10 270 V 输入实验波形



图 11 样机在壳温 125 °C 时,热分布结果

DC 变换器的性能对比结果如表 4 所示,可见本文研制的样机在输入电压等级、输出功率等级、功率密

度、转换效率等方面均大幅超越现有技术水平。

5 结 语

为了满足装备对 300 W 以上厚膜电源的应用需求,本文研制了一款 500 W 厚膜混合集成 DC/DC 变换器试验样机,采用厚膜混合集成工艺,金属全密封封装结构,首次将移相全桥软开关电路拓扑结构应用于厚膜电源领域,试验样机将厚膜混合集成 DC/DC 变换器的最大输出功率由 150 W 提升至 500 W,最高功率密度由 100 W/in³ 提升至 167 W/in³,为厚膜混合集成电源往更大输出功率发展探索了一种新的实施途径,产品验证成熟形成批产能力后可为电子装备小型化、轻量化提供有力支撑。

表 4 本文与国内外大功率厚膜混合集成 DC/DC 变换器性能对比

研制厂家	输入电压/V	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W	产品尺寸/ (mm×mm×mm)	功率密度/ (W·in ⁻³)	转换 效率/%
美国 Interpoint 公司	16~40	15	8	120	63.50×38.30×10.16	80	87
美国 VPT 公司	16~40	15	8	120	63.50×38.30×10.16	80	86

续表 4

研制厂家	输入电压/V	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W	产品尺寸/ (mm×mm×mm)	功率密度/ (W·in ⁻³)	转换 效率/%
美国 IR 公司	16~40	15	8	120	63.50×38.10×9.65	84	85
	30~80	15	8	120	63.50×38.10×9.65	84	85
	80~160	15	8	120	63.50×38.10×9.65	84	87
	160~400	15	8	120	63.50×38.10×9.65	84	87
国内某厂家	16~40	15	10	150	63.50×38.30×10.16	100	91
本文试验样机	240~300	28	17.86	500	77.30×50.00×12.70	167	94

参考文献:

[1] 王浩. 厚膜混合集成电路封装互连材料和工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[2] 朱雨生, 施静, 陈承. 混合集成技术代际及发展研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (5): 438-450.

[3] 刘少鹏, 邵小亮. 一种星载微波接收机应用的全集成厚膜电源设计 [J]. 空间电子技术, 2021, 18 (2): 41-47.

[4] SINGH A, SHALINI R, KULKARNI S, et al. Thick film technology based DC-DC converter hybrid for space applications [C]//2021 Fifth International Conference on Electraical, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICECCOT). Bangalore: IEEE Press, 2021: 8-13.

[5] KIM N, HAN C. Thermal analysis and design of a 75-W hybrid-type DC-DC converter for space applications [J]. MicroelectronReliab, 2014 (54): 1555-1561.

[6] 褚恩辉, 金升, 张化光. 一种新型无源软开关变换器 [J]. 电子学报, 2010, 38 (8): 1963-1968.

[7] 余致远, 吴红飞, 花文敏, 等. 矩阵变压器+移相控制宽电压范围 LLC 变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (12): 3638-3645.

[8] Crane Aerospace & Electronics Power Solutions, MOR Single and Dual DC-DC Converters Datasheet [EB/OL].

(2021-04-27) [2023-01-20]. http://www.craneeae.com/sites/default/files/resources/MOR_DC_DC_Converters.pdf.

[9] VPT. Inc. DVFL2800S Series Datasheet [EB/OL]. [2023-01-20]. <https://www.vptpower.com/wp-content/uploads/2022/10/DVFL2800S-to-Rev-14.pdf>.

[10] Micross, AFL28XXS Series Datasheet [EB/OL]. [2023-01-20]. <https://www.micross.com/hi-rel-pow-er-solutions/dc-dc-converters>.

[11] 金宁治, 俄立明, 马腾, 等. 电动汽车车载移相全桥变换器改进研究 [J]. 电机与控制学报, 2021, 25 (9): 70-77.

[12] 邹扬, 赵隆冬, 朱晓辉, 等. 基于 GaN 器件的半砖 1kW 高压模块电源研制 [J]. 电力电子技术, 2021, 55 (11): 30-32, 49.

[13] 许章茁, 潘健. 移相全桥 ZVS 直流变换器研究综述 [J]. 电源学报, 2022, 20 (4): 11-27.

作者简介

高东辉 (1990—), 高级工程师, 主要研究方向为混合集成电路设计;

袁宝山 (1965—), 研究员级高级工程师, 主要研究方向为开关电源及混合集成电路设计;

蔡可红 (1980—), 研究员级高级工程师, 主要研究方向为混合集成电路设计;

黄煜炜 (1992—), 助理工程师, 主要研究方向为混合集成电路设计。