

交错并联 Boost 型开关电源模块设计

左官芳¹ 魏雪义² 管月³

(1. 无锡学院电子信息工程学院 无锡 214000; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 214400;
3. 中国电子科技集团公司第五十八研究所 无锡 214000)

摘要:交错并联 Boost 变换器结合电流模控制方式不仅能够实现相位间电流均流,而且还可以减少器件的电流应力。介绍了 Boost 在交错并联结构下的工作原理,采用了自适应导通时间的谷值电流模式控制策略,并采用 II 型补偿加快了系统的响应时间。基于 Simplis 搭建模型并仿真,通过软件仿真证明了该控制方式是可行的;设计并做出了一款微型电源模块,内部包含两路 Boost 电路,每路可单独运行亦或两路工作在交错并联模式。该电源模块因其控制策略和开关管集成在硅芯片上,所以模块小、质量轻,输出端电压波动范围小,峰值转换效率可达 90%。

关键词:交错并联;均流;自适应;电源模块

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3040

Power supply module design for peak current module control

Zuo Guanfang¹ Wei Xueyi² Guan Yue³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Wuxi University, Wuxi 214000, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 214400, China;
3. China Electronics Technology Group Corporation 58th Institute, Wuxi 214000, China)

Abstract: The staggered parallel Boost converter combined with the current mode control mode can not only realize the current flow between the phases, but also reduce the current stress of the device. This article systematically introduces the working principle of Boost under the staggered parallel structure, adopts the valley current mode control strategy of adaptive conduction time control, and adopts type II compensation to accelerate the response time of the system. Based on Simplis, a model was built and simulated, and the feasibility of this control method was demonstrated through software simulation. We have designed and developed a miniature power module that includes two Boost circuits, each of which can operate independently or operate in interleaved parallel mode. The power module is small, lightweight, and has a small range of output voltage fluctuations due to its control strategy and switch tube integration inside the chip. The peak conversion efficiency can reach 90%.

Keywords: staggered parallel; average flow; adaptive; power-supply module

0 引言

由于交错并联技术能够使系统稳定、减少整体的响应时间、减少输出端电压波动范围,同时系统结构简单容易实现,因此逐渐应用于低压大电流场合,尤其是开关电源。文献[1-2]将交错并联技术应用到光伏发电系统中,使光伏发电系统的性能和效率得到了一定程度的提高。文献[3]将交错并联结构与 Boost 变换器结合,提高了功率

密度和转换效率,验证了该拓扑结构的优越性和可行性。文献[4]利用 PI 控制器和滑模控制器相结合的优势,缩短了变换器动态响应时间,但设计复杂。文献[5-7]利用峰值电流模控制方式,提高了系统响应速度,但需要斜坡补偿电路。文献[8-10]利用谷值电流模式与固定导通时间(constant on time, COT)控制方式,提高系统瞬态响应速度,但输入电压变化引起开关频率变换。文献[11-13]利用数字控制方式,具有不错的效果,但由于数字器件自身

大小和外围功率器件的限制,电源模块的体积很难再缩小。文献[14-15]将开关管和控制逻辑部分集成在同一硅芯片上,不仅缩小开关电源的体积,同时也为电源模块的发展奠定了基础。

针对以上问题,本文设计电源模块采用交错并联结构作为 Boost 变换器的拓扑;基于 COT 的自适应导通时间 (average operation time, AOT) 控制方式;将开关管和控制部分集成在同一片硅芯片上,采用 BGA 封装,外形尺寸为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。模块电源拥有两路 Boost 升压电路,可交错并联工作,负载电流为 6 A,也可每路单独工作,负载电流为 3 A。具有较低的输出电压纹波、较快的系统响应速度,系统开关频率为 500 kHz,最高电压转换效率为 90%。

1 拓扑结构与工作原理

交错并联 Boost 型 DC/DC 变换器拓扑如图 1 所示,第 1 路 Boost 由 V_1 、 V_2 、 L_1 构成;第 2 路 Boost 由 V_3 、 V_4 、 L_2 ;第 1 路主开关管为 V_1 ,同步整流管为 V_2 ;第 2 路主开关管为 V_3 ,同步整流管为 V_4 ;两路主开关管的控制脉冲波形之间有 180° 的相位差。

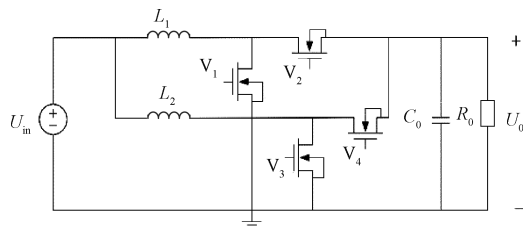


图 1 交错并联 Boost 变换器拓扑

Fig. 1 Interleaved parallel Boost converter topology

两路 Boost 采用交错并联的技术在电流模的控制方式下,使流过每路 Boost 拓扑结构的电流相等,使电感元器件和开关管器件之间电流应力减弱。两路 Boost 拓扑结构中的电感电流纹波之间作用抵消,流过输出端的滤波电容的电流减小,让输出端电压纹波降低,电容的损耗减小。因两路 Boost 拓扑结构相同且对称分布,当占空比保持 0.5 不变时,两路的电感电流作用相互抵消,输出端的电压纹波降为 0。当 $D > 0.5$ 和 $D < 0.5$ 时,主开关管 V_1 和 V_3 的驱动脉冲波形 SW_1 、 SW_2 ,电感 L_1 和 L_2 的电流 i_{L1} 、 i_{L2} 以及两电感的电流之和 i_{sum} 波形如图 2 所示。

$D < 0.5$ 时,在一个开关周期时间内存在 3 种工作状态。

$t_0 \sim t_1$ 工作状态 2(图 3(b)),主开关管 V_1 关上, L_1 电流 i_{L1} 增加,主开关管 V_3 关断, L_2 电感电流 i_{L2} 下降,由于 $D < 0.5$,电感电流 i_{L1} 上升的斜率高于电感电流 i_{L2} 下降的斜率,因此两者之和 i_{sum} 上升。

$t_2 \sim t_3$ 工作状态 3(图 3(c))。主开关管 V_3 开始导

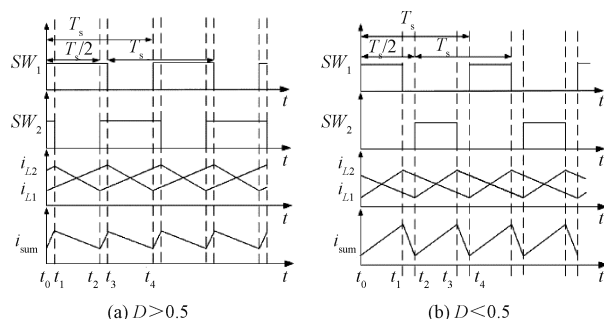


图 2 Boost 变换器控制波形

Fig. 2 Boost converter controls the waveform

通, L_2 电感电流 i_{L2} 开始上升,主开关管 V_1 继续关断, L_1 电感电流 i_{L1} 继续下降,由于 $D < 0.5$,电感电流 i_{L2} 上升的斜率高于电感电流 i_{L1} 下降的斜率,因此两者之和 i_{sum} 上升。

$t_3 \sim t_4$ 工作状态 4(图 3(d))。主开关管 V_1 和 V_3 均关断,同步整流管 V_2 和 V_4 导通,两路均处于续流状态, L_1 电感电流 i_{L1} 下降, L_2 电感电流 i_{L2} 下降,两者之和 i_{sum} 下降。

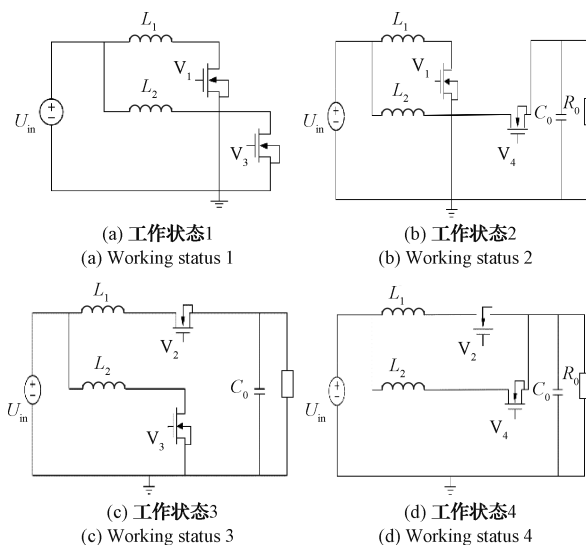


图 3 交错并联 Boost 工作模式

Fig. 3 The staggered parallel Boost working mode

电源模块按照 2-4-3-4-2 工作状态往复工作,当主开关管 V_1 或 V_3 断开时,电感电流之和 i_{sum} 达到最大值 max,当主开关管 V_1 或 V_3 闭合时,电感电流之和 i_{sum} 达到最小值 min。

$D > 0.5$ 时与上述工作原理类似,模块电源按照 1-2-1-3-1 工作状态往复工作,电感电流之和 i_{sum} 电的达到最大值与最小值时刻与 $D < 0.5$ 一致。

通过上述分析可知, i_{sum} 纹波与 D 的关系为:

$$i_{sum} = \left(\frac{U_0}{L_1} + \frac{U_0}{L_2} \right) (0.5 - D) T_s, 0 < D \leq 0.5 \quad (1)$$

100 μF , $f=500\text{ kHz}$ 。图 6(a)所示为输入端电压 9 V、输出端电压 12 V、负载电流 3 A;图 6(b)所示为输入端电压 9 V、输出端电压 22.5 V、负载电流 3 A。两路 Buck 跳变点脉冲波形 SW_1 和 SW_2 , i_{L1} 和 i_{L2} 波形、两

路电流之和 i_{sum} 波形和输出端电压波动范围 U_0 。图 6(c)、(d)所示分别为系统补偿前波特图与系统补偿后波特图,包含低频直流增益、系统穿越频率以及相位裕度等。

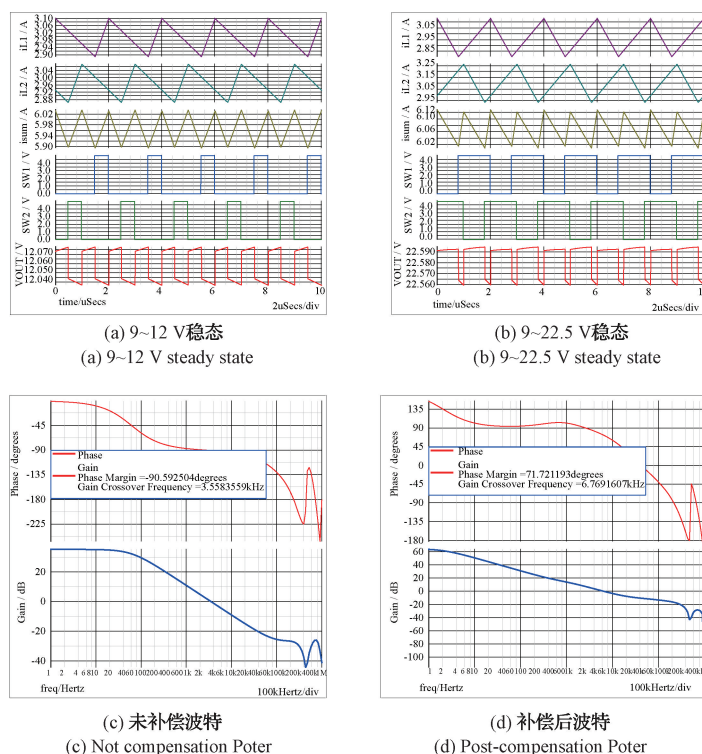


图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation result diagram

从系统的稳定输出波形得到,系统开关的频率为输出端电压波动范围的频率的 1/2,且输出电压纹波低于 45 mV,与图 2 进行比较可知,理论分析与仿真结果基本一致。从系统补偿波形可以看出,补偿后系统低频增益提高,高频抗干扰能力提高,对比图 5 看出,仿真与理论计算基本一致。

4 电源模块设计

电源模块的设计指标如下:系统工作频率为 500 kHz,输入电压为 9 V、12 V 的输出电压,负载电流为 3 A,输出电压纹波小于 45 mV,峰值转换效率可达 90%。两路 Boost 升压电路可以工作在交错并联状态,此时输出负载电流可达 6 A,也可以实现每路单独工作,带载电流为 3 A;输出端的电压波动范围小于 45 mV,峰值转换效率最多可达 90%。

4.1 SOC 设计

芯片内部集成逻辑控制和 4 个开关管,电流的采样通过获取第 1 路 Boost 拓扑结构的同步整流管两端电压下降方法来实现,结构如图 7 所示。

将输出电压通过运算放大器产生电流信号与谷值电

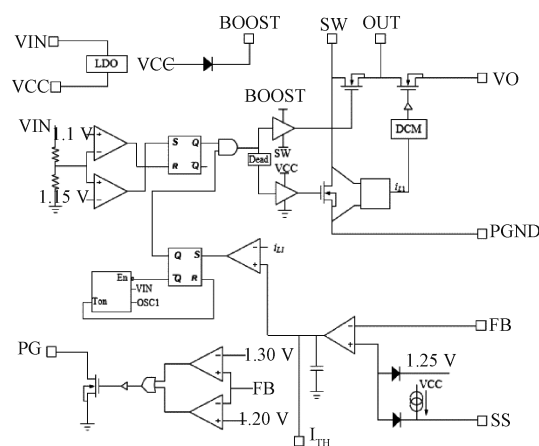


图 7 芯片内部设计示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the chip internal design

流 i_{L1} 进行比较,实现谷值电流模控制;通过芯片内部振荡器(oscillator, OSC)振荡产生脉冲与 RS 触发器和计时器相结合产生脉冲控制信号。AOT 控制降低了设计的复杂度,控制容易实现且提高系统的稳定性。芯片采用对称式

4.2 电源模块设计

Fig. 10 Experimental platform construction

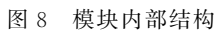


Fig. 8 Internal structure diagram of the module

按照电源模块的布局以及封装形式封装后,得到的电源模块的实物如图 9 所示。

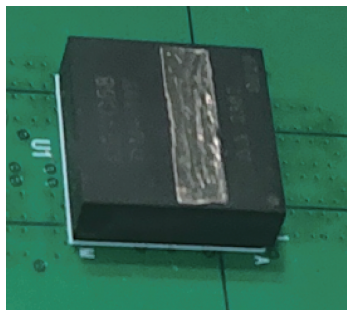


图 9 电源模块实物

Fig. 9 Physical diagram of the power supply module

利用实验设备对该电源模块进行实验数据测量平台的搭建,平台完成后测量电源模块的各方面性能参数波形,分析该电源模块并与同类电源模块参数进行对比,体现该电源模块的性能优劣。

利用直流电源为该电源模块提供直流稳定电压;直流电子负载为电源模块提供负载电流;电流钳测量电源模块负载电流突变情况;示波器测量显示电源模块的重要节点波形,具体实验平台搭建如图 10 所示。

图 11(a)所示为每路 Boost 独立运行时波形,可以看出输出电压纹波为 60 mV,输出电流为 3 A,与设计参数一致。图 11(b)所示为两路 Boost 交错并联工作时的脉冲波形,上面为通道一的 SW_1 波形,下面为通道二的 SW_2 波形,两路驱动信号下降沿相差 180° 与控制策略一致,同时电压纹波为 20 mV 左右比单路工作电压纹波小得多,体现了交错并联控制策略的优越性。图 11(c)所示为电感电流从 3 A 突变到 6 A 时,输出电压变化波形。图 11(d)所示为阶跃突变时的放大实验波形,通过该波形可以清晰的分析出输出端电压波动的最大值为 30 mV,稳定的时间大概为 $50 \mu\text{s}$,由此体现出该模块电源的稳定性较好、动态响应速度快。

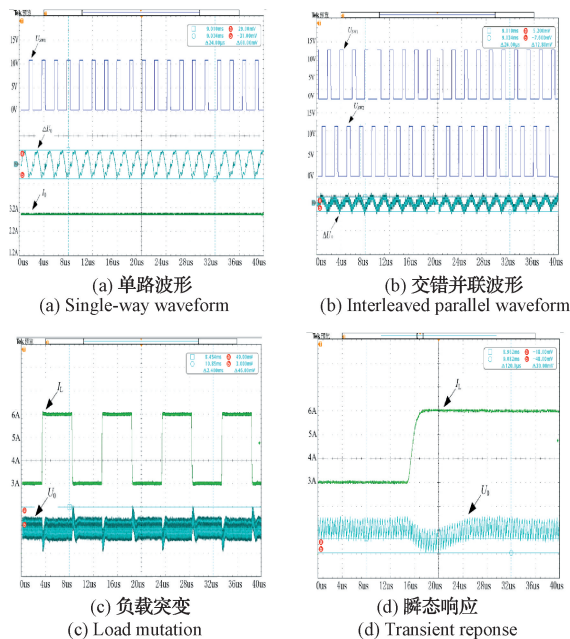


图 11 实验波形

Fig. 11 For the experimental waveform

该模块电源工作在 9 V 输入, 12 V 输出时采集的数据绘制而成的效率曲线如图 12 所示, 可以看出, 当负载电流为 2 A 左右时效率达到最大值, 约为 90%, 全负载范围

内效率均高于 82%，整体性能较好。

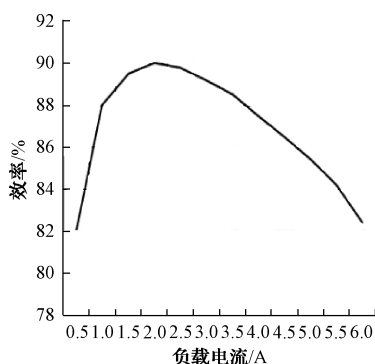


图 12 效率曲线

Fig. 12 The efficiency curve

5.3 电源模块对比

本文设计的电源模块与 MXDD50-36S24 电源模块进行对比,具体的对比结果如表 1 所示。

表 1 电源模块与 MXDD50-36S24 对比

Table 1 Compensation of this power supply module and MXDD50-36S24

对比	MXDD50-36S24	本文电源模块
输入—输出/V	9~12	9~12
负载电流/A	2.5	6
效率/%	80	82
封装尺寸/mm	80×55×21	30×24.5×3.2

通过该电源模块与 MXDD50-36S24 电源模块对比可得,该电源模块负载电流大、转换效率高、封装尺寸小等优点。

6 结 论

使用交错并联的 Boost 拓扑结构,设计一款 AOT 控制的尺寸为 15 mm×15 mm×3 mm 的轻薄型模块电源,输入电压为 9 V,输出电压为 12 V,输出端负载电流为 3 A。实现 9 V 输入转 12 V 输出,负载电流为 3 A。可以实现每路单独工作,每个通道提供 3 A 负载电流,亦或两路 Boost 工作在交错并联的形态,实现相间电流均流,超低输出电压纹波,输出负载电流可达 6 A。控制逻辑和开关管集成在同一硅芯片上,因此模块电源体积小、瞬态响应速度快,可靠性高。

参 考 文 献

- [1] KUMAR P P, KUMAR S S. Isolated interleaved boost converter based single-phase grid-interfaced photovoltaic system[J]. Electric Power Components and Systems, 2024, 52(8): 1352-1367.
- [2] KARTHIKEYAN V, JAMUNA V, RAJALAKSHMI

D. Interleaved boost converter for photovoltaic energy generation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3407(622-622): 97-103.

- [3] 刘帅, 韦莉, 张逸成, 等. 耦合电感式新型交错 Boost 软开关变换器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1340-1347.
- LIU SH, WEI L, ZHANG Y CH, et al. Study on coupled inductor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(12): 1340-1347.
- [4] 崔楠, 许家群. Buck 变换器导通模式转换滑模 PI 混合控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 254-262.
- CUI N, XU J Q. Buck converter leads the mode conversion sliding mode PI hybrid control strategy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 254-262.
- [5] MOTHAFAR A D R M. Peak current mode control of a two-module independent-input series-output boost converter with mismatched inductors [J]. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 2023, 10(5): 1751-1762.
- [6] NUGROHO A, RIJANTO E, ROZAQI L. Buck converter control for lead acid battery charger using peak current mode[J]. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2017, 8(2): 686-694.
- [7] LI Z, JI Y, YANG S, et al. A dual-mode high-voltage high-efficiency peak-current-mode asynchronous buck converter [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2016, 25(11): 1650136-1650136.
- [8] HUANG P R, CHANG C Y. Design of DC-DC buck converter based on improved voltage-mode COT control [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2023, 32(4): 2350063.
- [9] YI C T, YUAN J L, PING C C C. A Quasi-V2 hysteretic buck converter with adaptive COT control for fast DVS and load-transient response in RF applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(3): 531-535.
- [10] KENG C, JAMES G, KANG P, et al. Buck circuit design with pseudo-constant frequency and constant on-time for high current point-of-load regulation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(10): 4062-4075.
- [11] 郭文君, 姜帆, 贾立朋, 等. 基于 FPGA 的开关电源数字控制技术[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 172-176.
- GUO W J, JIANG F, JIA L P, et al. Digital control technology based on FPGA [J]. Electronic

- Measurement Technology, 2021, 44(15): 172-176.
- [12] 莫恭防, 韩鹏, 玉升灿, 等. 基于同步整流技术的高效率恒压恒流电源[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 102-107.
- MO G F, HAN P, YU SH C, et al. High efficiency constant voltage constant current power supply based on synchronous rectification technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 40(12): 102-107.
- [13] DASARI S M, MANI V, MOPIDEVI S. Fuel cell-based high-gain boost converter fed single-phase multi-level inverter controlled by FPGA controller [J]. JNMES, 2021, 24(3): 208-217.
- [14] FRANCESCO S, RUDIGER K, NEIL G, et al. A hysteretic buck converter with 92.1% maximum efficiency designed for ultra-low power and fast wake-up SoC applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(6): 1856-1868.
- [15] LEE Y H, HUANG S C, WANG S W, et al. Power-tracking embedded buck-boost converter with fast dynamic voltage scaling for the SoC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1271-1282.

作者简介

左官芳, 高级工程师, 主要研究方向为电源及煤矿安全供电。

E-mail: zgf@cw Xu. edu. cn

魏雪义(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为开关电源。

E-mail: 20211249693@nuist. edu. cn