

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.05.006

低功耗 Boost 型 DC/DC 变换器

李学敏, 廖无限, 任于涵

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 分析 Boost 和同步整流开关电源电路的工作原理, 设计 Boost 电路的主要参数及控制回路, 最后测试了基于 LM5121 的低功耗 Boost 型 DC/DC 变换器样机, 其输出电压为 48 V, 输出功率为 100 W。测试结果表明: 样机输出电压稳定, 整机效率高达 88%, 它是一种经济适用的低功耗小型开关电源。

关键词: 低功耗; Boost; 开关电源; 同步整流; LM5121

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)05-0027-05

Boost DC/DC Converters with Low Power Consumption

LI Xuemin, LIAO Wuxian, REN Yuhan

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract : An analysis has been made of the operating principle of Boost and synchronous rectifier switch power supply circuit, and a design has been proposed for the main parameters and control circuit of Boost circuit, followed by the test of a low-power-consumption DC/DC Boost converter prototype based on LM5121, with 48 V its output voltage and 100 W its output power. Testing results substantiate the stable output voltage of the prototype, with an overall efficiency as high as 88%, thus proving it to be an economical and applicable switching power supply with low power consumption.

Keywords : low power consumption; Boost; switch power supply; synchronous rectification; LM5121

0 引言

开关电源具有体积小、轻量化和高效率等特点, 被广泛应用于通信、航空航天、医疗等领域^[1-3]。DC/DC 变换器是将一种直流电能转换成另一种或多种直流电能的开关电源^[4]。整流器件的开关损耗及导通损耗是开关电源功率损耗的重要因素^[5]。传统的整流器件一般采用肖特基二极管 (Schottky barrier diode, SBD)。由于受材料物理特性和制造技术水平的限制, 肖特基二极管的正向导通压降比较高 (甚至达到 1 V) 和导通阻抗高, 这导致了开关电源的功率损耗大, 效率不高。因此, 传统整流器件已经不能满足更低电压、更大电流、高效率的要求。为了

提高开关电源效率、降低损耗, 同步整流技术成为研究热点^[6-9]。同步整流是将场效应管 (MOSFET) 取代整流二极管, 以降低整流损耗的一项新技术。MOSFET 的正向导通压降可以达到 0.006 V 左右, 导通电阻也可以降到毫欧级 (mΩ) 以下。

因此, 本文采用同步整流技术设计了一种低功耗 Boost 型 DC/DC 变换器。该变换器降低了功率损耗, 提高了转换效率。

1 Boost 型变换器

Boost 型变换器的电路图如图 1 所示。Boost 电路拓扑包含输入直流电源 U_i 、输入滤波电感 L、开

收稿日期: 2016-07-09

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目 (15C0393)

作者简介: 李学敏 (1989-), 男, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: 894697139@qq.com

关管 Q、二极管 D、输出滤波电容 C 和负载 R^[10]。当开关管 Q 导通时, 二极管 D 反偏, 处于截止状态, 此时输入电源 U_i 给滤波电感 L 储能 (或励磁), 负载能量由输出滤波电容 C 提供; 当开关管 Q 截止时, 二极管 D 正偏, 处于导通状态, 此时电感电流经二极管续流, 输入电源 U_i 和滤波电感 L 共同向负载提供能量的同时, 补充输出滤波电容在前一间隔所损失的能量。输出滤波电容的作用有 2 个方面: 1) 开关管 Q 导通时, 给负载提供能量; 2) 滤除输出电压的纹波分量, 使输出电压平稳。二极管 D 起到换流跟续流的作用。

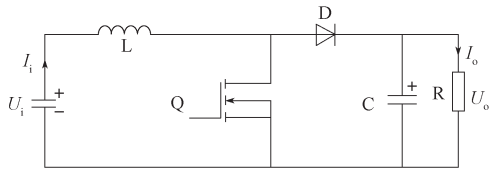


图 1 Boost 型变换器电路
Fig. 1 Diagram of Boost converter circuit

2 Boost 型同步整流变换器

2.1 主电路工作原理

本文所设计的 Boost 型同步整流变换器如图 2 所示。该变换器包括输入直流电源 U_i 、输入滤波电感 L、开关管 Q_1 和 Q_2 、输出滤波电容 C 和负载 R。滤波电感 L 工作在 CCM 模式。

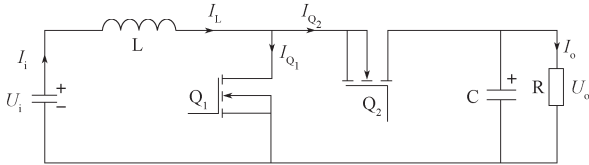


图 2 Boost 型同步整流变换器
Fig. 2 Diagram of the Boost synchronous rectifier converter

电感 L 的临界值由式 (1) 决定^[12],

$$L = \frac{(U_o - U_i)T(1-D)}{2I_o} \quad (1)$$

式中: U_o 为输出电压; U_i 为输入电压; I_o 为输出电流; T 为周期; D 为电路 PWM 信号的占空比, 即

$$D = 1 - \frac{U_i}{U_o} \quad (2)$$

由式 (2) 也可以推导出输出电压的公式, 即

$$U_o = \frac{U_i}{1-D} \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 输出电压由 PWM 占空比决定。在 Boost 电路中, 占空比 D 小于 1, 可知, 输出电压高于输入电压, Boost 电路也称升压电路^[13]。

2.2 主电路工作过程分析

主电路的稳态原理波形图如图 3 所示^[11]。

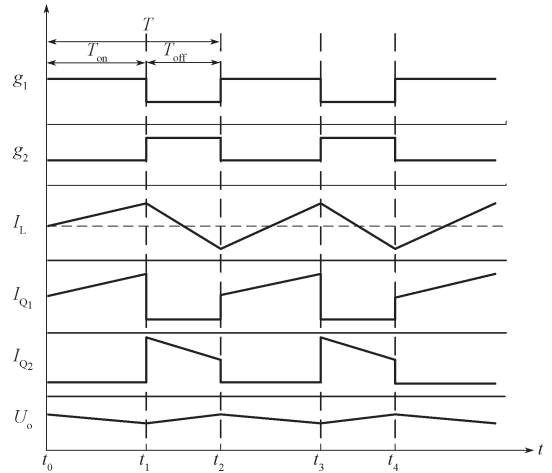


图 3 CCM 模式下主电路稳态时原理波形图
Fig. 3 Oscillogram of the principles governing the steady main circuit under CCM mode

图 3 中, g_1, g_2 是开关管 Q_1 和 Q_2 的栅极驱动信号, I_L 是电感 L 的电流信号, I_{Q1}, I_{Q2} 是开关管 Q_1 和 Q_2 的电流信号, U_o 是负载的输出电压, T_{on} 是主开关管 Q_1 在一个周期内的导通时间, T_{off} 是主开关管 Q_1 在一个周期内的截止时间, T 是 T_{on} 与 T_{off} 之和, 即 $t_0 \sim t_2$ 。

t_0 之前, 假设电感 L 没有储能, 开关管 Q_1, Q_2 为不导通状态。

$t_0 \sim t_1$ 为一个周期 T 内的开关导通时间 T_{on} , 开关管 Q_1 导通, 开关管 Q_2 截止。输入电源 U_i 给滤波电感 L 储能 (或励磁)。电感中的电流 I_L 和开关管 Q_1 的电流 I_{Q1} 都呈线性增长。负载能量由输出滤波电容 C 提供, 只要电容足够大, 输出电压 U_o 的变化会很小, 近似恒定值。

$t_1 \sim t_2$ 为一个周期 T 内的开关截止时间 T_{off} , 开关管 Q_1 截止, 开关管 Q_2 导通。电感电流经开关管 Q_2 续流。输入电源 U_i 和滤波电感 L 共同向负载提供能量, 同时补充输出滤波电容 C 在前一间隔所损失的能量。电感中的电流 I_L 和开关管 Q_1 的电流 I_{Q1} 都呈线性减小。

3 驱动电路

3.1 控制芯片 LM5121 的简介

考虑低功耗 Boost 型 DC/DC 变换器的结构和性能, 本文选用了一款同步升压专业芯片 LM5121 作为电路的核心控制器。LM5121 是 TI 公司设计的一款针对高效率、高功率升压稳压器应用的同步升压控制器, 其开关频率最高可编程至 1 MHz。通过将 2 个耐用的 N 通道 MOSFET 栅极驱动器与自适应死区控制搭配使用实现同步控制。用户还可选二极管仿真模式实

现断续模式运行, 从而提高轻负载条件下的效率^[14]。

LM5121 最小输入电压为 3.0 V (启动时为 4.5 V), 最大输入电压为 65 V, 输出电压高达 100 V。其主要应用于 12, 24, 48 V 电压等级的电源系统, 例如汽车

车电源、高电流升压电源、电池供电系统等。该芯片的内部结构如图 4 所示。引脚 1~20 的定义详见文献[14], EP 为芯片封装的裸露焊盘, 没有内部电气连接, 应焊接到大地以减小热阻。

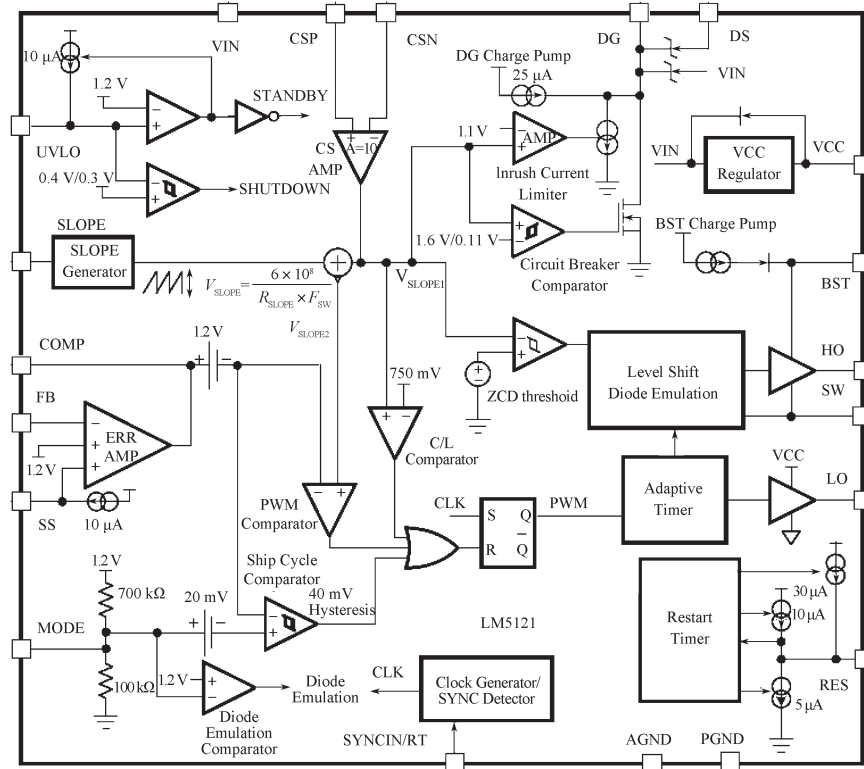


图 4 LM5121 的内部结构图

Fig. 4 Diagram of the internal structure of LM5121

3.2 驱动电路设计

LM5121 作为 DC/DC 变换器整个电路的核心, 通过控制 PWM 信号的输出来调整电路输出电压, 引脚 16 LO 和引脚 19 HO 输出 PWM 驱动信号。DC/DC

变换器的主电路和芯片的外围电路设计见图 5, 该电路包含输入滤波电路、欠压保护电路、控制电路、反馈电路、输出滤波电路。具体设计方法详见文献[14]。

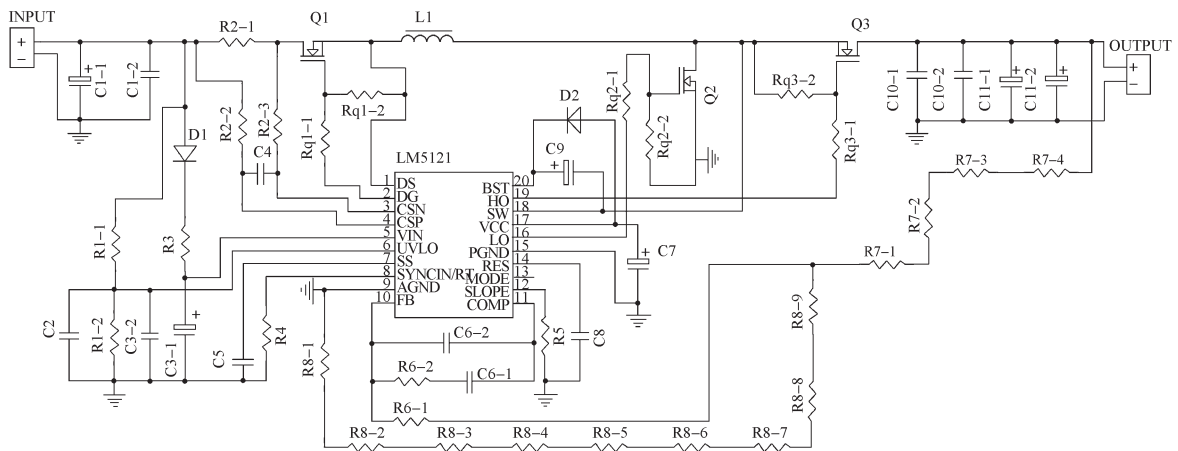


图 5 电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the circuit

DC/DC 变换器基本参数为: 开关频率 $f_s=50 \text{ kHz}$, 主电路输入电压 (INPUT) $U_i=12 \text{ V}$, 额定输出电压

(OUTPUT) $U_o=48 \text{ V}$, 输出最大电流 $I_o=6 \text{ A}$ 。主要器件的参数见表 1, 表中参数名称详见图 5。

表1 主要器件参数设计表

Table 1 The designed parameter table

器件类型	名称	数值
电容/ μF	C1-1	100
	C1-2	22
	C10-1, C10-2	150
	C11-1, C11-2	22
电阻/ $\text{k}\Omega$	R4	180
	R1-1	60
	R1-2	8
电感/ μH	L	20
MOSFET	Q2, Q3	IRFB4110

4 实验结果与分析

根据上述 Boost 型同步整流变换器的工作原理和参数设计, 研制了一款 12 V/48 V 实验样机。样机实物如图 6 所示。

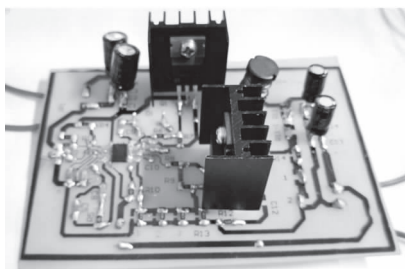
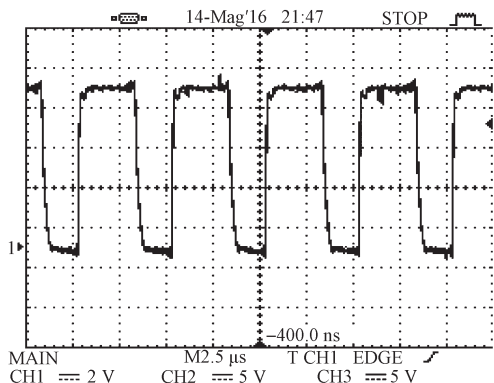


图6 Boost型同步变换器样机

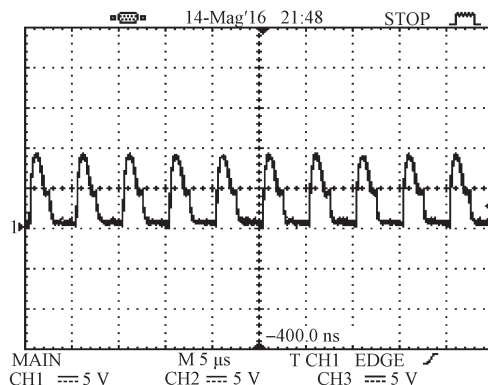
Fig. 6 A physical map of Boost synchronous rectifier converter

开关管工作频率为 50 kHz, 电路占空比为 0.7。开关管 Q_1 的驱动波形如图 7 所示。从图可知, 驱动电压为 8 V, 波形基本正常, 开关管 Q_1 正常工作。

图7 开关管 Q_1 驱动波形Fig. 7 Driving waveform of switch Q_1

DC/DC 变换器中开关管 Q_2 的驱动波形如图 8 所示。从图中可知, 驱动电压为 8 V。当开关管 Q_1 导通时, 开关管 Q_2 关断; 当开关管 Q_1 关断时, 开关管 Q_2

导通, 2 个开关管相互交错导通。开关管 Q_2 实现了传统整流二极管的续流作用, 这也说明本设计符合同步整流技术要求。

图8 开关管 Q_2 驱动波形Fig. 8 Driving waveform of switch Q_2

DC/DC 变换器样机的输出电压波形如图 9 所示。从图可知, 样机的输出电压为 48 V, 输出电压波形基本是一条平滑的直线, 这表明电路设计基本符合预期效果。

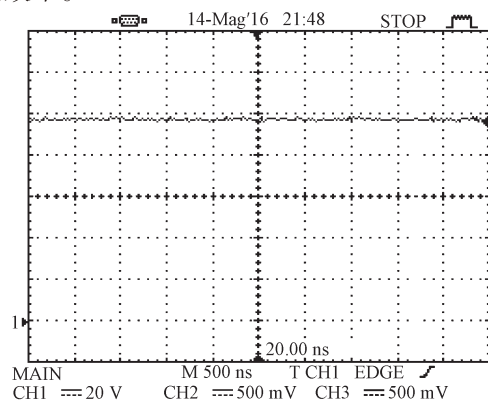


图9 样机输出电压波形

Fig. 9 Waveform of the prototype output voltage

经测试, 当输入电压 $U_i=12\text{ V}$ 时, 样机处于满载状态, 输入电流 $I_i=8.33\text{ A}$, 可得: 输入功率 $P_i=U_i I_i=99.96\text{ W}$, 输出功率 $P_o=U_o I_o=87.66\text{ W}$, 整机效率 $\eta=P_o/P_i \approx 0.88$, 因此, 该值满足设计要求。

5 结语

本文设计了一款基于同步整流 PWM 控制芯片 LM5121 的低功耗 Boost 型 DC/DC 变换器。文中详细分析了其电路原理, 并且给出较为详尽的设计步骤。测试结果表明: 样机输出直流电压稳定, 电压纹波较小, 满载效率高, 满足设计要求。由此可见, 采用功率 MOSFET 代替传统整流二极管的同步整流技术, 可减少开关电源的功率损耗, 提高转换效率, 具有良好的推广价值。

参考文献:

- [1] 张兴柱. 开关电源功率变换器拓扑与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 2-4.
ZHANG Xinzhu. The Design and Topology of Switching Power Supply Power Converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 2-4.
- [2] 张文鼎, 肖强晖, 廖无限. 用于EPS的12 V/48 V软开关电源变换器研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 70-75.
ZHANG Wending, XIAO Qianghui, LIAO Wuxian. Research of 12 V/48 V Soft Switching Power Converter for EPS[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 70-75.
- [3] 文立群, 肖强晖. 基于UC3846的有源嵌位单极PFC开关电源[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(2): 52-55.
WEN Liqun, XIAO Qianghui. UC3846-Based Active Clamp and Signale-Stage PFC Switched Power Supply[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 52-55.
- [4] 张纯亚, 何林, 章治国. 开关电源技术发展综述[J]. 微电子学, 2016, 46(2): 255-260.
ZHANG Chunya, HE Lin, ZHANG Zhiguo. The Development of Summary in Switching Power Supply Technology[J]. Microelectronics, 2016, 46(2): 255-260.
- [5] 陈坚. 电力电子学: 电力电子变换和控制技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 35-40.
CHEN Jian. Power Electronics: Power Electronic Transformation and Control Technology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 35-40.
- [6] 何希才, 张明莉. 新型稳压电源及应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 33-37.
HE Xicai, ZHANG Mingli. New Power and Application Examples[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 33-37.
- [7] 金钊. 直流稳压电源的性能测试与优化[D]. 济南: 山东大学, 2012.
JIN Zhao. Performance Testing and Optimization of the DC Power Supply[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [8] 张 建, 王建冈. 电动汽车用高效率DC/DC电源变换器设计[J]. 现代仪器, 2012, 18(6): 51-54.
ZHANG Jian, WANG Jiangan. Design on High Efficiency Power DC/DC Converter Used by Electric Vehicle[J]. Modern Instruments, 2012, 18(6): 51-54.
- [9] 周鹏飞, 钟再敏. 基于LM5175的Buck-Boost车用开关电源设计[J]. 电子科技, 2016, 29(2): 129-133.
ZHOU Pengfei, ZHONG Zaimin. An Automotive Buck-Boost Type Switching Power Supply Based on LM5175 [J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(2): 129-133.
- [10] 刘秋菊. Boost DC/DC变换器的电路分析及仿真[J]. 科技创新导报, 2009(5): 99.
LIU Qiuju. The Boost DC/DC Converter Circuit Analysis and Simulation[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(5): 99.
- [11] 徐静平, 谭亚伟, 钟德刚. 高效率PWM DC/DC转换器的设计[J]. 计算机与数字工程, 2012, 31(5): 28-31.
Xu Jingping, Tan Yawei, Zhong Degang. Design of A High-Efficiency PWM DC /DC Converter[J]. Computer and Digital Engineering Institute, 2007, 35(9): 139-142.
- [12] 周志敏, 周纪海. 开关电源实用技术: 设计与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 98-110.
ZHOU Zhimin, ZHOU Jihai. Switching Power Supply in Practical Techniques: Design and Application[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2003: 98-110.
- [13] 肖强晖. 现代电力电子技术[M]. 北京: 光明日报出版社, 2002: 117-122.
XIAO Qianghui. Modern Power Electronic Technology[M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2002: 117-122.
- [14] Texas Instruments. LM5121-Q1 Wide Input Synchronous Boost Controller with Disconnection Switch Control[S/OL]. Dallas: Texas Instruments, 2013: 4-13. [2016-02-03]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5121.pdf>.

(责任编辑: 邓 彬)