

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.013

# 用于EPS的12 V/48 V软开关电源变换器研究

张文鼎, 肖强晖, 廖无限

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 分析了ZVT-BOOST电路的工作原理, 设计BOOST电路的主要参数及控制回路, 设计了一个基于TL494的用于EPS的软开关电源变换器样机, 其输出电压为48 V, 输出功率为100 W。对样机的测试结果表明: 本样机能稳定输出电压, 整机效率大于90%, 性能满足设计要求。

**关键词:** TL494; EPS; 软开关; 稳压

**中图分类号:** TN86

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)01-0070-06

## Research of 12 V/48 V Soft Switching Power Converter for EPS

Zhang Wending, Xiao Qianghui, Liao Wuxian

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

**Abstract:** Analyzed the working principle of ZVT-BOOST circuit, designed main parameters and the control loop of BOOST circuit, and devised a TL494-based soft switching power converter prototype for EPS, whose output voltage was 48 V and output power was 100 W. The test result shows that the prototype outputs voltage stably, the performance meets the design requirements, and the efficiency is beyond 90%.

**Keywords:** TL494; electric power steering (EPS); soft-switching; voltage stabilizing

## 0 引言

转向系统是汽车的主要子系统之一, 其性能直接关系到汽车的操纵稳定性和舒适性, 且对于确保行车安全、减少交通事故以及保护驾驶员的人身安全、改善驾驶员的工作条件起重要作用。电动助力转向系统 (electric power steering, EPS) 是近些年出现的一种先进的汽车转向系统。其利用电动机产生动力, 帮助驾驶员进行转向操作。该系统主要由3部分构成: 信号传感装置、转向助力机构、电子控制装置。相比较于传统的液压式转向系统和机械式转向系统, EPS在环保、节能、结构简单、布置灵活、产品减重等诸多方面拥有较大优势, 因此, 被广泛应用于汽车领域<sup>[1]</sup>。而电源对于各种电气设备就像

心脏对于人体一样重要, 如果没有了电源则各种用电设备将无法运行。随着电源技术的发展, 各种新型器件、新电路拓扑及先进的控制策略应用到电源装置中, 特别是DC/DC高频开关电源在各个领域中得到越来越广泛的应用<sup>[2]</sup>。

为了使开关电源达到高功率密度和易于便携的要求, 通常采用高频PWM软开关控制方式, 这样不仅有利于减小开关电源的体积, 而且还能有效降低开关器件的损耗和噪音<sup>[3]</sup>。

综上所述, 本文分析了ZVT-BOOST电路的工作原理, 并对BOOST电路的主要参数及控制回路进行设计, 然后采用Saber仿真软件进行建模, 并对升压电路进行仿真分析。仿真结果表明: ZVS PWM软开

收稿日期: 2014-12-02

基金项目: 湖南省科技厅科研基金资助项目(12FJ4266), 湖南省教育厅科研基金资助项目(13C023)

作者简介: 张文鼎(1990-), 男, 湖南湘乡人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为软开关, DC/DC以及PWM控制,

E-mail: 465964605@qq.com

关变换技术具有开关损耗小、恒频控制和变换效率高优点<sup>[4]</sup>。最后,研制了一款48 V/100 W的实验样机,并给出了相关的实验波形,实验结果表明:电源的输入为12 V,输出为48 V/100 W,整机效率大于90%,基本达到设计指标,适用于EPS电动转向系统。

## 1 ZVT 零转换电路原理

ZVS PWM BOOST电路如图1所示。直流电源 $U_m$ 、输入滤波电感 $L_r$ 、主开关管 $Q_1$ 、二极管 $D$ 、输出滤波电容 $C$ 和负载 $R$ 构成基本的BOOST电路拓扑。辅助开关管 $Q_2$ 、二极管 $D_1$ 、谐振电感 $L_r$ 和电容 $C_r$ 构成有源软开关环节。开通时, $C_r$ 和 $L_r$ 构成的谐振电路可以减小并延缓主开关管 $Q_1$ 的开通电流上升率,使 $Q_1$ 和 $D_2$ 具有零电压开通环境,可有效减少开关损耗。关断时, $Q_1$ 与并联的电容 $C_r$ 可以有效抑制主开关管关断时的电压上升率,为 $Q_1$ 和 $D_2$ 营造零电压开通环境,可有效减少关断损耗。二极管 $D_1$ 和 $D_3$ 起到续流和换流的作用<sup>[5-7]</sup>。

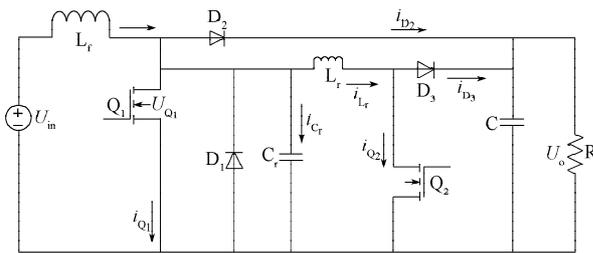


图1 ZVS PWM BOOST 电路  
Fig. 1 ZVS PWM BOOST circuit

## 2 电路工作过程分析

### 2.1 软开关工作条件

所谓软开关,就是利用电感电流不能突变这个特性,用电感来限制开关管开通过程的电流上升速率,实现零电流开通;利用电容电压不能突变的特性,用电容来限制开关管关断过程的电压上升速率,实现零电压关断;利用LC谐振回路的电流与电压存在相位差的特性,用电感电流给MOS结电容放电,从而实现零电压开通;或是在管子关断之前,电流就已经过零,从而实现零电流关断<sup>[5]</sup>。

### 2.2 主电路工作过程

主电路软开关BOOST拓扑结构稳态时原理波形图如图2所示。图中, $g$ 是主管驱动电压波形, $v_{ds}$ 是主管VDS电压波形, $i_d$ 是主管漏极电流, $g_a$ 是辅管驱动电压, $i_a$ 是辅管集电极电流, $v_{ds_a}$ 是辅管VDS电压波形, $i_{L_1}$ 是谐振电感电流, $i_p$ 是主二极管电流。

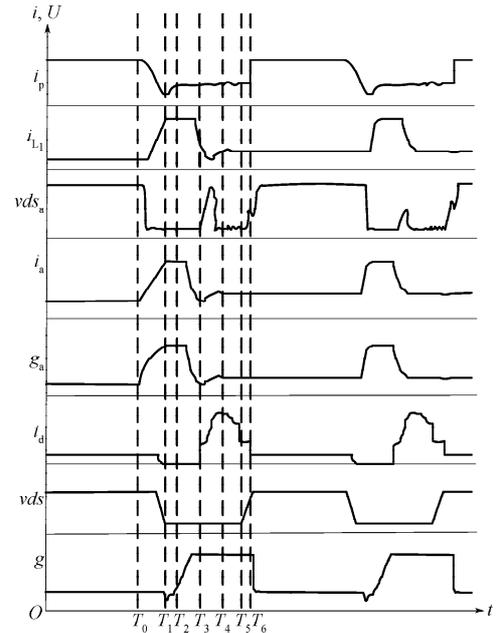


图2 主电路软开关BOOST拓扑结构稳态时原理波形图

Fig. 2 The principle waveform of BOOST topology of main circuit switching at steady-state  
主电路工作原理如下:

$T_0$ 时刻之前,主二极管导通,向负载供电。

$T_0$ 时刻,辅管开通。由于电感 $L_1$ 的存在,辅管电流线性上升,主二极管电流线性下降。因此,辅管是零电流开通,此时,辅管驱动波形的开通过程存在Miller效应。而主二极管的关断过程是相当的“软”,反向恢复电流较小。在主二极管电流完全转移到电感 $L_1$ 中以后,主管的VDS电压开始谐振下降。

$T_1$ 时刻,主管VDS电压降到零,主管旁边的二极管 $D_3$ 导通,将VDS箝位为零。此时开通主管就属于零电压开通。

$T_2$ 时刻,主管开通。从主管 $Q_2$ 波形可以看出,主管是在零电压零电流的状态下开通的。从栅极信号可以看出,主管 $Q_2$ 没有开通过程的Miller效应。主管开通后,辅管可以关断。

$T_3$ 时刻,辅管关断。从辅管 $Q_1$ 波形可以看出,其关断过程中,辅管的VDS电压在 $C_2$ 的缓冲下缓慢上升,电压和电流重叠部分较小。本文选择高速的IGBT (insulated gate bipolar transistor)型号为MGW12N120,以实现辅管的零电压关断。谐振电感 $L_1$ 中的能量向 $C_2$ 中转移。当 $C_2$ 电压达到输出电压时,箝位二极管导通,保证了辅管的VDS电压不会超过输出电压<sup>[8]</sup>。

$T_4$ 时刻,当谐振电感 $L_1$ 的能量完全转移到 $C_2$ 中以后,箝位二极管MUR460\_2关断反偏。

$T_5$ 时刻,主管关断。输入电流通过 $C_2$ ,MUR460\_2,MUR460\_1向负载 $R$ 输出。在 $C_2$ 的缓冲下,主管的VDS电压线性上升,呈现良好的零电压关断状态。

$T_6$ 时刻,  $C_2$ 的能量完全释放完毕,  $C_2$ 两端电压为零。主二极管 MUR1560 导通, 输入电流通过主二极管向负载输送能量。

### 3 驱动电路

#### 3.1 控制芯片 TL494 的简介

TL494 是一种固定频率脉宽调制电路, 其主要为

开关电源电路而设计<sup>[6]</sup>。主要特征有: 集成了全部的脉宽调制电路; 内置主从振荡器和误差放大器; 内置 5.0 V 参考基准电压源; 可调整死区时间; 内置功率晶体管可提供最大 500 mA 的驱动能力; 输出可控制推挽电路或单端电路; 自带欠压保护。

TL494 的内部框图如图 3 所示。

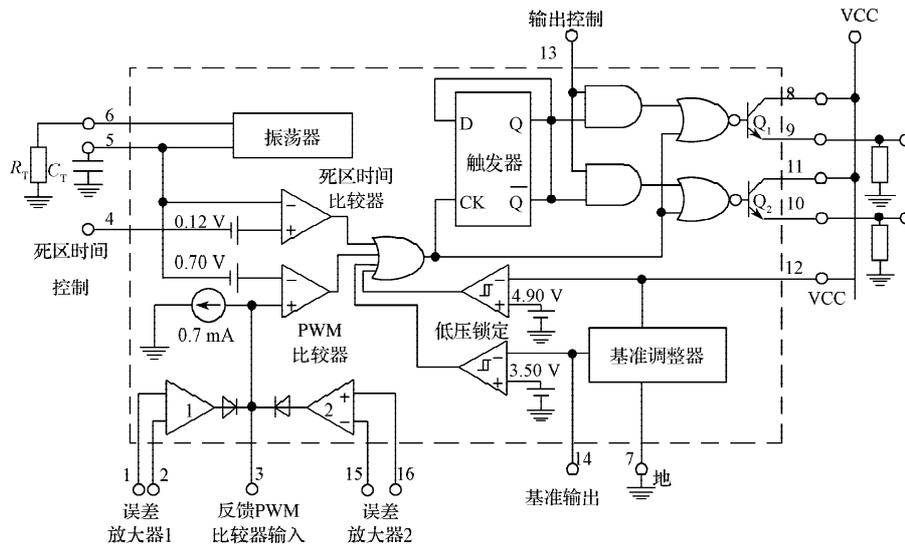


图3 TL494 结构原理图

Fig. 3 The structure diagram of TL494

图 3 中, 引脚功能如下:

引脚 1 为第一组误差放大器的同相输入端;

引脚 2 为第一组误差放大器的反相输入端;

引脚 3 为相位校正和增益控制;

引脚 4 为死区控制端, 改变此脚电压, 可改变死区时间;

引脚 5 为内部振荡电路, 外接振荡电容  $C$ ;

引脚 6 为外接振荡电阻  $R$ , 和引脚 5 一起产生锯齿波电压送比较器和死区时间比较器, 振荡频率为  $f_{osc}=1/(RC)$ ;

引脚 7 为共地端, 也是供电的负极端;

引脚 8 和 11 为两路输出放大管的集电极;

引脚 9 和 10 为内部驱动放大管的发射极;

引脚 12 为供电端, 其允许输入电压可达 8~40 V, 因此无需外部稳压器;

引脚 13 为输出控制端, 当  $U_{13}=0$  时, 用于驱动单端电路, 该脚接地时, 为并联单端输出方式, 接引脚 14 时, 为推挽输出方式;

引脚 14 为内部 5.0 V 基准电压输出端, 最大输出电流 10 mA;

引脚 15 和 16 分别为第二组误差放大器的反相和同相输入端。

#### 3.2 驱动电路工作原理

TL494 为驱动电路, 驱动开关管, 其电路原理如图 1 所示。引脚 9 和引脚 10 产生输入信号 PWM<sup>[9-12]</sup>, 如图 4 所示。

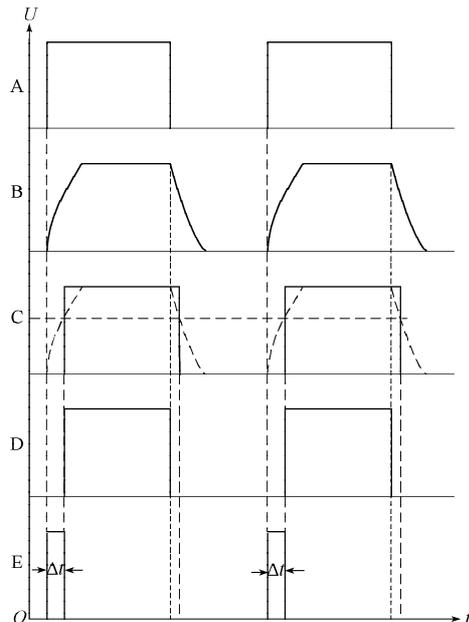


图4 PWM 脉冲时序图

Fig. 4 PWM pulse timing diagram

$AR_5, C_5, R_{21}$  组成一个有源滤波电路 (见附图 1),

该电路利用  $C_5$  充放电的缓冲时间, 将引脚 8 输出的方波 A (见图 4) 变换成一个具有上升沿和下降沿的波形 B。AR<sub>1</sub>, R<sub>10</sub>, R<sub>9</sub> 和 U3A 组成一个电压比较器 (见附图 1), 其中 AR<sub>1</sub> 输出电压为

$$U_{out1} = 12 \times \frac{R_9}{R_9 + R_{10}} \quad (1)$$

$U_{out1}$  作为 U3A 反向输入端。只有当 U3A 的正向输入端  $U_1$  高于  $U_{out1}$  时, U3A 才有输出, 即

$$U_{out2} = \begin{cases} 1, & U_1 > U_{out1}; \\ 0, & U_1 < U_{out1} \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 经过 U3A 以后输出的波形是一个移相的波形, 即波形 C。Q<sub>10</sub> 是由 2N4351 构成的或门电路, 其作用是将 TL494 的第一路输出波形 A 和经过 U3A 变换后的波形 C 作或运算。

$$U_{out2} = U_1 + U_3 \quad (3)$$

由式 (3) 可知,  $U_{out2}$  的输出波形为  $U_1$  和  $U_3$  的公共部分, 即波形 D, 该波形用作主开关的驱动信号。Q<sub>9</sub> 是由 2N4351 构成的异或门电路, 其作用是将 TL494 的输出波形 A 和波形 C (见图 4) 做异或运算, 即

$$U_{out3} = U_1 \oplus U_{out2}, \quad (4)$$

$U_{out3}$  的输出波形为波形 E, 其用作辅助开关管的驱动信号。该波形的导通时间非常短, 其导通时间为

$$\tau = \Delta t = C_5 \times \frac{R_9 \times R_{23}}{R_9 + R_{10}}, \quad (5)$$

式中  $C_5$  为附图 1 中电容  $C_5$  的电容量。

### 4 实验结果与分析

根据上述 ZVT-BOOST 的工作原理和参数设计值, 本文设计了实际电路, 如图 5~6 所示。整个电路的原理图如附图 1 所示。



图 5 PCB板正面

Fig. 5 The front of PCB

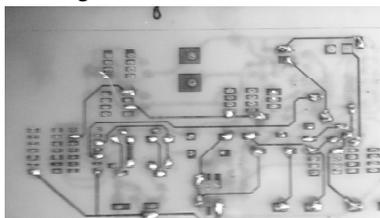


图 6 PCB板反面

Fig. 6 The back of PCB

软开关变换器样机的主开关及辅助开关管的波形如图 7 所示。其中, 通道 CH1 显示的是辅助开关管 PWM 波形, 通道 CH2 显示的是主开关管的 PWM 波形。从波形图可以看出, 主开关管关断时, 辅助开关管为低电平; 辅助开关管开通时, 主开关管为低电平, 这说明了本课题组设计的样机起到了软开关的作用。

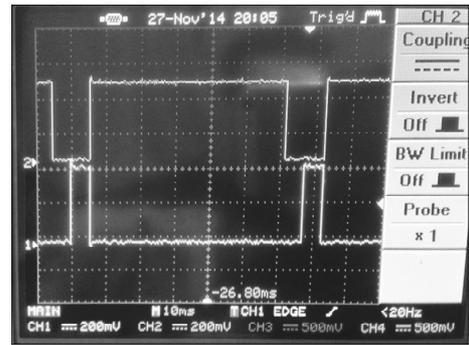


图 7 软开关变换器样机的主开关及辅助开关管输入波形

Fig. 7 The input waveform of main switch and auxiliary switch of soft-switching converter prototype

该变换器样机的输出电压波形如图 8 所示, 即通道 GH1 的波形。示波器探头用 X10 档位, 示波器设置为 DIV 1 V 模式。由图可知, 样机的输出电压为 48 V 左右, 基本达到预期效果。

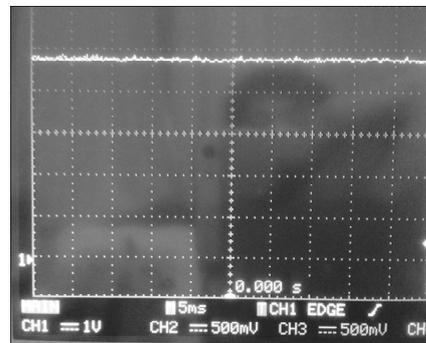


图 8 电路输出电压波形

Fig. 8 Circuit output voltage waveform

对样机进行实测的结果表明, 该变换器符合软开关要求, 能稳定输出电压, 达到了预期效果。

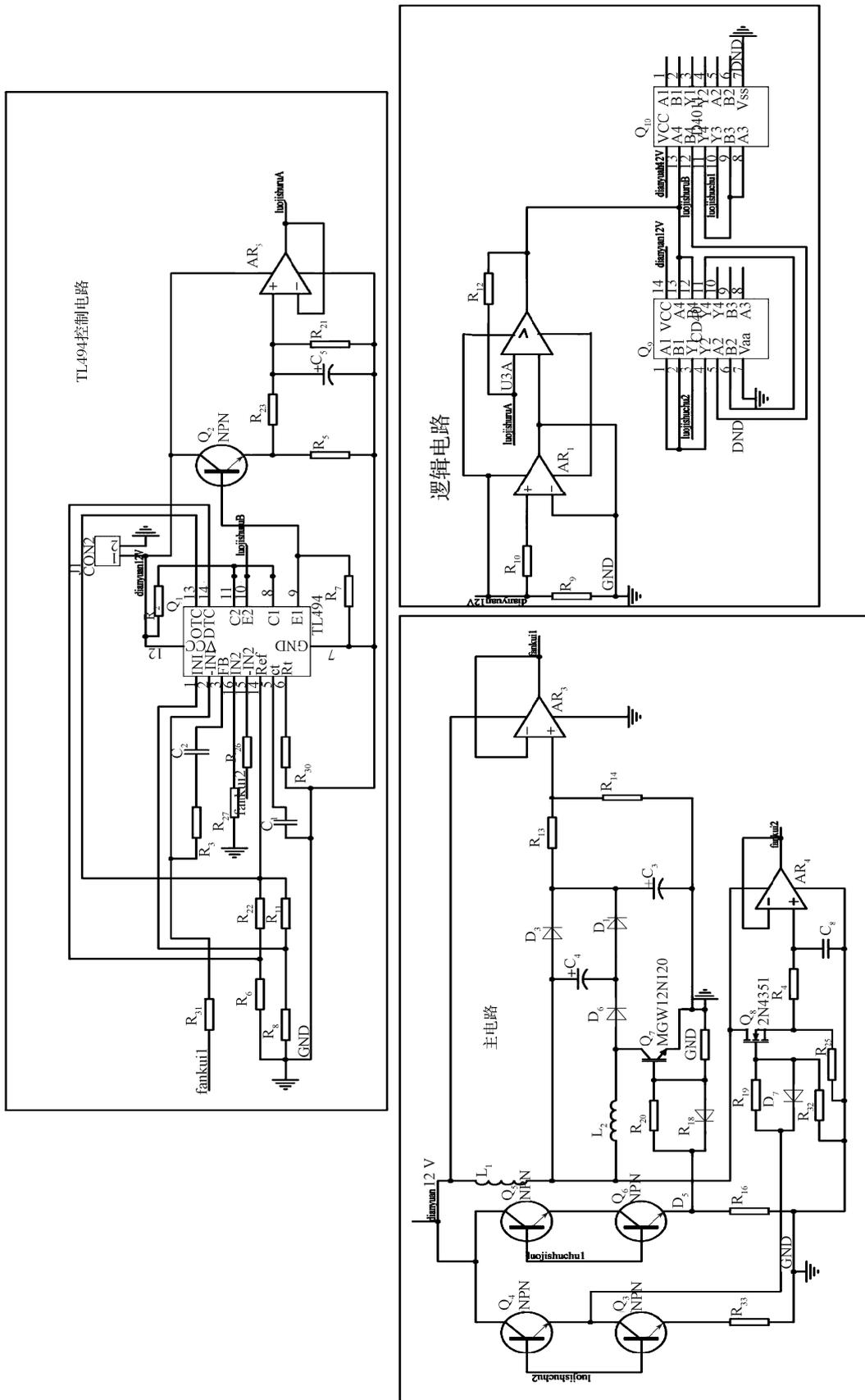
### 5 结语

本文设计了一个 12 V/48 V 软开关变换器。该变换器是利用逻辑电路将同一 PWM 波形做运算变换, 输出的主 PWM 和辅助 PWM 波形用于驱动主开关和辅助开关; 通过 MOSFET 辅助开关管实现软开关, 提高电源工作效率, 同时能够保证其输出直流电压的稳定性。对 12 V/48 V 软开关变换器的测试结果表明, 该变换器能应用于 EPS 电动转向系统。

## 参考文献:

- [1] 徐冉. 汽车电控助力转向系统[J]. 机电工程技术, 2010, 39(8): 18-22.  
Xu Ran. Steering System of Automotive Electronic Control [J]. Electrical Engineering Technology, 2010, 39(8): 18-22.
- [2] 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.
- [3] 吴忠强, 王志君. DC/DC变换器的一种无源控制方案[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 147-150.  
Wu Zhongqiang, Wang Zhijun. Kind of Passivity Control Scheme of DC/DC Converter[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(2): 147-150.
- [4] Garcia F S, Pomilio J A, Deaecto G S, et al. Analysis and Control of DC-DC Converters Based on Lyapunov Stability Theory[C]//2009 Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). San Jose: IEEE, 2009: 2920-2927.
- [5] 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. Practical Technology of Switching Power Supply: Design and Application[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2003: 98-110.
- [6] 阮新波, 严仰光. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 87-91.  
Ruan Xinbo, Yan Yangguang. DC Switching Power Supply Soft-Switch Technology[M]. Beijing: Science Press, 2000: 87-91.
- [7] 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.
- [8] 魏伟, 李军, 魏岚婕. 一种软开关电力操作电源的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(11): 47-49.  
Wei Wei, Li Jun, Wei Lanjie. Study of a Soft-Switching Power Supply Operation[J]. Power Electronics, 2007, 41(11): 47-49.
- [9] 周志军. 软开关电源设计与仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
Zhou Zhijun. Design and Simulation of Soft Switching Power Supply[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [10] 刘光亚, 方治昊. 基于软开关的24 V开关电源的设计与仿真[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(2): 1-3.  
Liu Guangya, Fang Zhihao. Design and Simulation of 24 V Switching Power Supply Based on Soft Switching[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(2): 1-3.
- [11] 牛义. 基于软开关技术的PWM整流系统的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.  
Niu Yi. Research of PWM Rectifier System Based on Soft Switching Technology[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [12] 文立群, 肖强晖. 基于UC3846的有源嵌位单级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 Single-Stage PFC Switched Power Supply[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(2): 52-55.

(责任编辑: 邓彬)



附图1 电路原理图  
Fig. 1 The principle diagram of the circuit