

基于同步 Buck 电路的小功率电子负载设计

梁伟,杨春玲,朱敏,张岩

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为满足实验室电源测试的需要,设计了一种基于同步 Buck 电路的小功率电子负载,分为主电路和控制电路两部分。提出一种基于同步 Buck 电路的改良的主电路结构,为了实现负载的连续变化,采用数字 PID 控制,根据主电路小信号数学模型计算出 PID 参数范围。针对所提出的电子负载设计方案制作了实物电路板,研究表明设计出来的电子负载能够长时间稳定运行,符合设计要求。

关键词: 电子负载;同步 Buck 电路;控制电路;PID 控制

中图分类号: TN710

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200389

中文引用格式: 梁伟,杨春玲,朱敏,等. 基于同步 Buck 电路的小功率电子负载设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 106-109.

英文引用格式: Liang Wei, Yang Chunling, Zhu Min, et al. Low power electronic load design based on synchronous buck circuit[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 106-109.

Low power electronic load design based on synchronous buck circuit

Liang Wei, Yang Chunling, Zhu Min, Zhang Yan

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To meet the needs of laboratory power testing, we designed a small power electronic load based on synchronous buck circuit, which is divided into two parts: the main circuit and the control circuit. An improved main circuit structure based on synchronous buck circuit is proposed and we choose to adopt digital PID control to realize continuous load change, the PID parameter range is calculated according to the small signal model of the main circuit. According to the design scheme of electronic load, a real circuit board is made. The research shows that the designed electronic load runs stably for a long time, and meets the design requirements.

Key words: electronic load; synchronous buck circuit; control circuit; PID control

0 引言

各种电源产品必须在出厂前测试数十小时,以检验其技术指标和性能。电子负载的发明与应用提高了电源测试的质量与效率,有利于自动测试系统平台的建立^[1]。

目前电子负载的主电路多采用 Boost 电路,因其输入电流连续,容易控制。但其存在很多缺点,如输出负载不能短路,也不能断路,否则会烧毁器件;升压电路的输出电压更大,对电路安全性要求更高,且损耗增加;功率不能连续调节,而是从大于零的某一值以上开始调节。而 Buck 电路稳定性较高,不易损坏,功率可以从零开始连续调节,但存在输入电流不连续的问题,导致电子负载不能连续变化。本文以 Buck 电路作为主电路拓扑结构,通过对电路进行改良解决了这个问题。

1 整体方案设计

系统硬件电路有主电路和控制电路两大部分,其中控制电路又包括信号发生电路、电流信号放大电路、控

制电路、驱动电路和辅助电源电路几部分。此次设计的电子负载需要实现的功能是,主电路部分需要模拟信号发生器发生的任意波形信号,以满足不同情况的带载要求。总体框图如图 1 所示。

给定信号与从主电路采样的电流信号经过比较后送入 PWM 控制器,PWM 控制器输出两个互补的 PWM 信号送入驱动电路,驱动电路输出开关管的控制信号控制主电路开关管的通断,使主电路输出电流跟随给定变化,从而使电路呈现不同的负载特性。

2 主电路设计

2.1 主电路结构设计

由于金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)的导通电阻可以达到几毫欧或更小,且它们的电流可以在两个方向上流动,因此将整流技术与降压转换器相结合,利用低电压的专用 MOSFET 导通电阻(同步 MOSFET)代替降压转换器中的肖特基二极管,获得同步整流降压转

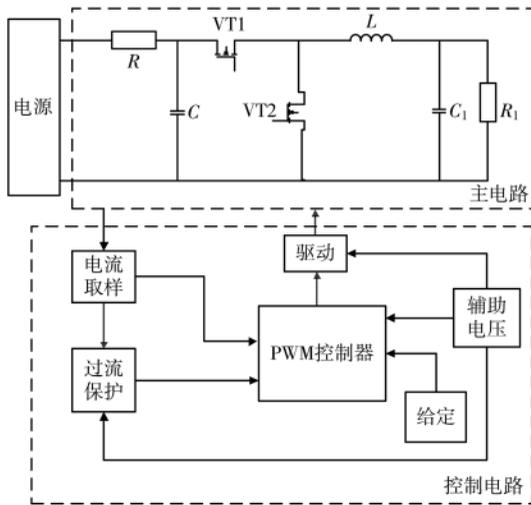


图1 系统总体框图

换器(称为同步降压转换器),同步降压转换器仍属于降压转换器拓扑结构,其工作特性与降压转换器的工作特性基本相同^[2]。这样可以减少传导损耗。同步电路的控制需要一对互补的PWM波并增加死区。

同步Buck电路结构简单,电路稳定性高,且输入电流可以从零以上调节,但其作为电子负载设计的主电路拓扑结构有一个很大的不足,即其输入电流是不连续的。

解决方案是,在电源与开关器件之间加入图2所示的电阻 R 和电容 C ,在开关器件断开时,电源经过电阻 R 向电容 C 充电。开关器件闭合时,电容 C 放电,同时电源经过电阻 R 和开关器件为负载供电。这样就保证了在电阻 R 处,无论开关器件通断均有电流通过,且由于稳态时电容电流在一周期内的平均值为零,故理论上可以用电阻 R 处的连续电流替代开关器件处的断续电流。

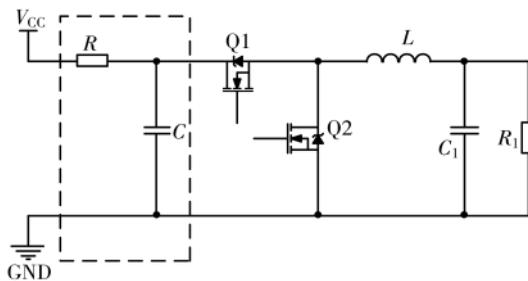


图2 改良的同步Buck电路拓扑

2.2 主电路器件选择

主电路给定的参数为:最大电源电压24V;最大输入功率120W;电流纹波10%;电阻 R_1 1.2Ω;电容 C_1 100μF。

2.2.1 电感选择

设电感电流波动为 Δi_L ,则电感电流上升过程和下降过程的电流波动量分别为:

$$\Delta i_{L_{\max}} = 5 \times 10\% = 0.5 \text{ A} \quad (1)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{-U_2}{L}(1-D)T \quad (2)$$

其中 U_1 为输入电压, U_2 为输出电压, T 为开关周期, D 为占空比。

输入电压 U_1 与输出电压 U_2 之间满足关系式:

$$D = \frac{U_2}{U_1} \quad (3)$$

由于电感电流上升过程和下降过程的电流波动量之和为零,得到:

$$\Delta i_L = \Delta i_{L1} = -\Delta i_{L2} = \frac{U_1 D(1-D)}{L} T \quad (4)$$

输入电压对应 $U_1 = 24 \text{ V}$ 。 $D = 0.5$ 时,电感电流纹波最大,即:

$$\Delta i_{L_{\max}} = \frac{24 \times 0.5 \times 0.5}{L} T = \frac{6}{L} T \quad (5)$$

取开关频率为40kHz, $T = 25 \mu\text{s}$ 。取 $\Delta i_{L_{\max}} = 5 \times 10\%$,则 $L = 300 \mu\text{H}$ 。

综上,在实际电路中,为满足纹波低于10%的要求,应使电感 $L \geq 300 \mu\text{H}$ 。在本次设计中电感取值为500μH。

2.2.2 开关管选择

根据以上参数,选择型号为IRF3205S的MOS管,参数如表1所示。

表1 IRF3205S 参数

型号	最高耐压/V	额定电流/A	静态漏源导通电阻/mΩ
IRF3205S	55	30	8

综上,在实际电路中,为满足纹波低于10%的要求,应使电感 $L \geq 300 \mu\text{H}$ 。在本次设计中电感取值为500μH。

2.2.3 改良部分电阻及电容选择

关于 R 取值的分析:若 R 取值过小,则对Buck电路输入电流滤波效果不明显,电流纹波较大甚至不连续;若 R 取值过大,则MOS管开通时 R 与原电路结构中的负载 R_1 串联,大大减小了电流值,破坏了原电路结构。且 R 取值过大导致电容充放电时间过长,输入电流需要很久才可以达到稳态值。综合以上因素, R 取为0.1Ω。

得到了以上参数后,利用MATLAB软件进行仿真实验,仿真结果如图3所示。其中 I_R 、 I_C 、 I_{MOS} 分别为流过电阻 R 、电容 C 和MOS管的电流。

由仿真结果可见,主电路进行改良之前输入电流不连续,在加入一个1mF大电容和一个0.1Ω电阻 R 后,流过电阻 R 的电流为连续的锯齿波,且改变前后两个电流的平均值几乎相等,说明可以用滤波后的连续电流替代原开关器件处的断续电流,使电子负载的功率可以连续调节,从而解决Buck电路输入电流不连续的问题。

3 控制电路设计

3.1 信号发生电路和PWM控制电路设计

利用STM32F103RCT6芯片实现信号发生器功能,其为大容量的STM32系列芯片,内含256KB的Flash存储

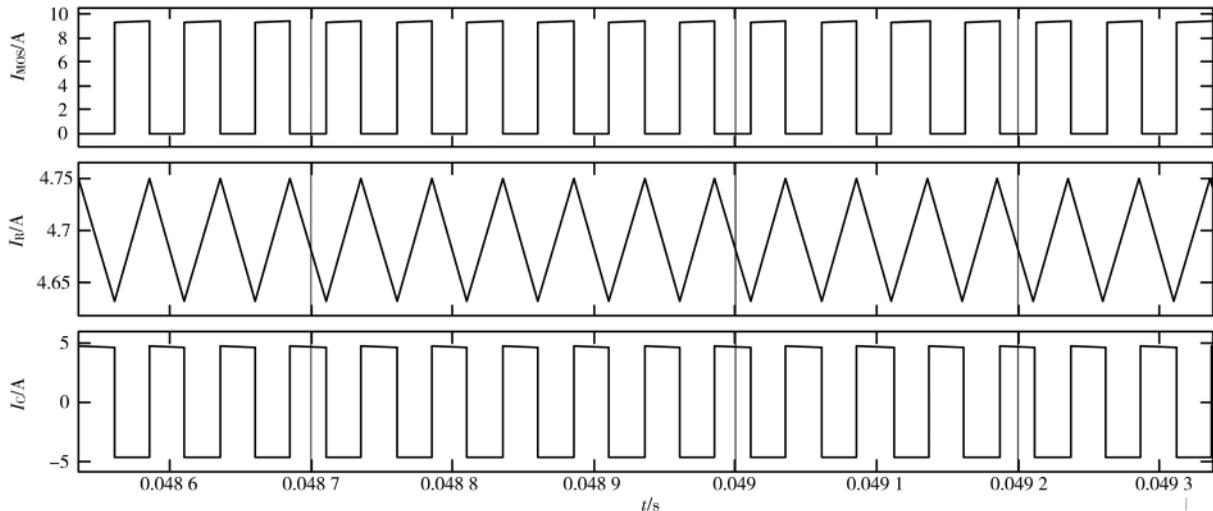


图3 电流仿真结果

器,引脚数目为64引脚^[3]。本次设计用到的其内部外设为:I/O口、定时器、A/D及D/A转换模块、SPI等,同时在电路中引出其SWD接口,方便下载调试。能产生任意波形并达到很高的频率,调节方式简单^[4]。

PWM控制电路核心同信号发生电路一样为STM32-F103RCT6芯片,方法为数字PID控制。首先对PWM模块进行配置,包括使能定时器TIMER1时钟为PLLCLK(72M);设置定时器CNT工作在加计数模式;使能PWM输出端口为PA7、PA8,这两个I/O口即可以输出互补的PWM波形,同时注意写入死区时间寄存器,使PA7、PA8输出的互补PWM具有一定的死区时间;然后向周期寄存器ARR中写入数值1799,设定开关频率为40kHz;最后使能计数器上计数溢出中断。

完成上述PWM模块配置后,当每次计数器上溢出时,进入到溢出中断函数,首先通过STM32F103内部的ADC模块采样当前输出电流,然后进行数字PID运算,控制PWM占空比使系统输出跟随给定变化^[5]。控制流程图如图4所示。

3.2 驱动电路设计

本次驱动电路设计核心为IR2104芯片,IR2104可以

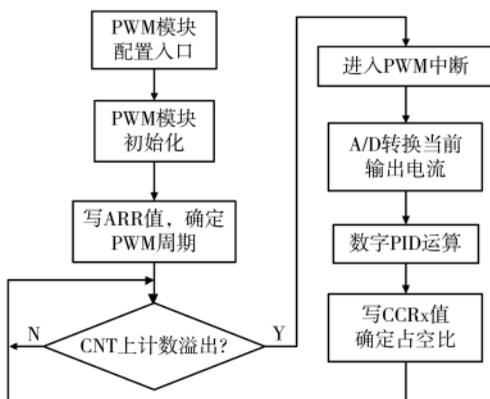


图4 数字PID控制流程图

驱动高端和低端两个N沟道MOSFET,能提供较大的栅极驱动电流,并具有硬件死区、硬件防同臂导通等功能^[6]。驱动电路原理图如图5所示。

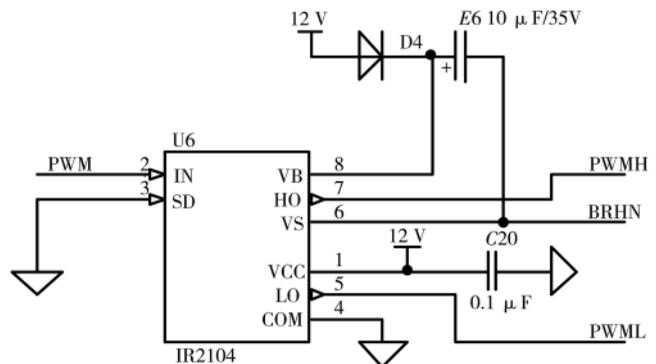


图5 驱动电路原理图

主电路中两个MOS管交替导通,当下桥臂导通,上桥臂关断时,VS脚的电位为下桥臂管的饱和导通压降,基本上接近地电位^[7]。此时VCC通过自举二极管D₄对自举电容E₆充电,使其接近VCC电压。当下桥臂关断时,VS端的电压升高,由于电容两端的电压不能突变,因此VB端的电平接近于VS和VCC端电压之和,而VB和VS之间的电压还是接近VCC电压。当下桥臂开通时,E₆作为一个浮动的电压源驱动下桥臂,E₆在下桥臂开通期间损失的电荷在下一个周期又会得到补充^[8]。这种自举供电方式就是利用VS端的电平在高低电平之间不停摆动来实现的。

3.3 辅助电源电路设计

本次设计的输入电源为直流24V供电,而电路中一些控制芯片、单片机需要+12V、+5V、+3.3V供电,故需要设计辅助电源电路。辅助电源电路如图6、图7所示。

图6中R₃和R₅为分压电阻,二极管D1的作用是防止输入24V电源接反,保护电路。

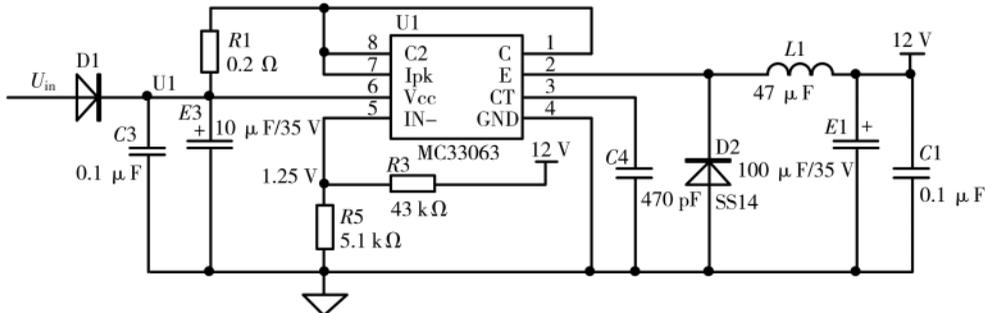


图6 辅助电源电路输出+12 V

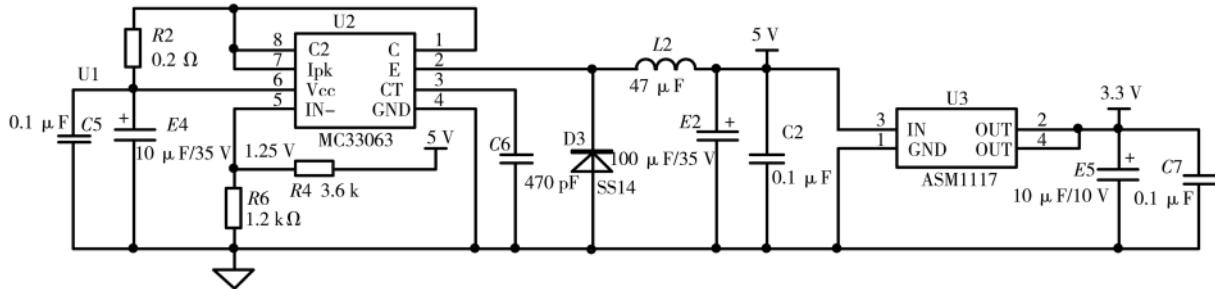


图7 辅助电源电路输出+5 V和+3.3 V

+5 V 电源在经过低压差线性稳压芯片 ASM1117 产生+3.3 V 电压,用于为单片机 STM32F103 供电。

图7中 R_4 和 R_6 为分压电阻。两个电路可以分别输出+12 V、+5 V及+3.3 V电压。 0.2Ω 电阻 R_1 及 R_2 作用为输出过流保护。

4 实验结果

按照前述的设计,制作了基于改良的同步 Buck 电路的电子负载样板,并进行了测试,性能满足以下要求:

- (1)电压输入范围:0~24 V,分辨率:0.1 V,精度:10%;
- (2)电流范围:0~30 A,分辨率:0.05 A,精度:10%;
- (3)功率范围:0~120 W,分辨率:0.3 W,精度:10%。

图8和图9是两种不同的给定:恒流给定和三角波给定的实验结果。其中位于图片上方的波形为信号发生器发生信号的波形,位于图片下方的波形为主电路输入电流的波形。由于有干扰等作用,给定波形和输出波形有少量尖峰。但可见实现了电子负载模拟信号发生器发生波形信号的功能。

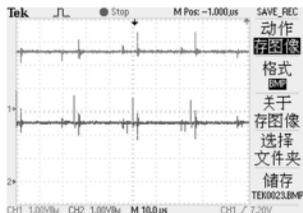


图8 恒流给定5 A 电子负载输出波形

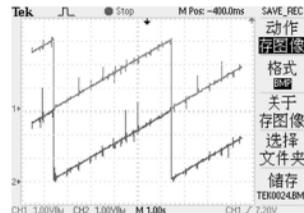


图9 三角波给定电子负载输出波形

5 结论

本文提出了一种基于改良同步 Buck 电路的电子负载设计方法。对主电路建立数学模型,通过 PID 参数整

定获取合适参数。在理论研究的基础上进行了实物电路板的制作与实验,测试结果表明,此次设计的电子负载稳定性较高,性能优良,能够很好地实现负载模拟功能。

参考文献

- [1] 蒋益飞,周杏鹏.基于 STM32 直流电子负载的设计与实现[J].仪器仪表用户,2012,19(3):68-70.
- [2] 向秀岑,李明辉.叠加定理在求解交流负载线中的应用[J].现代电子技术,2010(1):110-112.
- [3] CHANG M Y, LIN J Y, JUNG S L, et al. Design and implementation of read-time lossless dynamic load dimulator[C]. IEEE PESC, 1997.
- [4] 孙德霖.大功率自均流直流电子负载的研究[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [5] 杨亚萍,王成,雷新颖.电压型 PWM 整流电路研究与控制实现[J].电子设计工程,2016,24(15):154-156,159.
- [6] 莫熙,周伟,龚晓波,等.基于 STM32 的程控直流电子负载设计[J].电测与仪表,2014,51(18):85-91.
- [7] 周杨,潘三博.1 kW 直流电子负载的设计与仿真[J].上海电机学院学报,2019,22(5):283-289.
- [8] 刘琦,王璠,屠佳梦.基于 STC12C5A60S2 的电子负载设计[J].电子测试,2016(24):5-6.

(收稿日期:2020-05-15)

作者简介:

梁伟(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向:高精度仪器仪表设计。

杨春玲(1965-),女,博士,教授,主要研究方向:信号检测及处理、大规模集成电路实现、电子系统自动化测试。

朱敏(1985-),男,博士,副教授,主要研究方向:大规模集成电路 FPGA 设计、电子设计自动化 EDA 技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所