



基于 STM32F334 的数字开关电源

李 萍

(电子科技大学成都学院 电子工程系, 成都 611731)

摘要: 该文电源回路采用 Buck 同步整流拓扑结构, 选用具有浮点运算单元、高分辨率 PWM、高速 ADC、高速比较器等外设的 STM32F334 作为处理器, 使用 PID 控制算法, 完成一个数字电源设计。在负载变化过大导致输出误差较大时, 为了减少 PID 超调, 采用积分分离优化 PID 算法; 再通过选择合适采样点、设置合适的死区时间等控制方式优化算法; 提出了一套适合数字电源系统的解决方案。试验验证, 该电源具有高控制精度、高效率, 并具有良好的稳态和动态性能。

关键词: Buck 同步; STM32F334; PID; 积分分离

中图分类号: TM92

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20200490](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20200490)

Digital Switch Power Supply Based on STM32F334

LI Ping

(Department of Electronic Engineering, Chengdu College of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In this paper, the power circuit adopts the Buck synchronous rectification topology, selects the STM32F334 with peripherals such as float process unit, high-resolution PWM, high-speed ADC, high-speed comparator as the processor, and uses PID control algorithm to complete a digital power design. In case of big output error as a result of large load changes, the integral separation is used to optimize the PID algorithm in order to reduce the PID overshoot. In addition, the algorithm is optimized by selecting appropriate sampling points, setting appropriate dead time and other control methods. A set of solutions suitable for digital power system are proposed. Tests have verified that the power supply has high control accuracy, high efficiency, and good steady-state and dynamic performance.

Key words: Buck synchronization; STM32F334; PID; integral separation

传统的中小功率直流电源大部分主要采用模拟控制方法, 存在难以实现大功率变换和效率低下等缺点。模拟电源频率响应调整复杂繁琐, 难以实现高电压调整率等需求。而数字开关电源采用单片机技术, 改变算法参数, 即可改善频率响应等问题, 提高了电源工作的稳定性^[1]。本文以意法半导体推出的 STM32F334 处理器为控制核心, 采用 Buck 同步整流拓扑结构^[2]及优化后 PID 算法为控制方法^[3], 详细阐述了软件设计方案, 具有一定的参考意义。

1 数学控制模型

在 Buck 电路结构中, 控制方式是通过修改 PWM 波占空比改变开关管的通断时间从而控制输

出电压的大小^[4]。当输出电压超过给定值时, 减小 PWM 波占空比, 减少开关管的开通时间, 降低输出电压; 反之, 当输出电压小于给定值时, 则增加 PWM 波占空比, 增加开关管开通时间, 使输出电压升高。可见, 在控制器进行调解时所关心的是此次 PWM 波的占空比需要改变的量, 即每次输出控制量的增量。因此, 该系统使用增量式 PID^[5]控制, 其模型为:

$$\Delta u = u_n - u_{n-1} = k_p(e_n - e_{n-1}) + k_i e_n + k_d(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (1)$$

式中, u_n 为第 n 次采样时刻的控制器输出, 即文中的 PWM 占空比; u_{n-1} 为第 $n-1$ 次采样时刻的控制器输出, 亦是文中 PWM 占空比; e_n 为第 n 次采样时刻设定电压与实际输出电压采样值的偏差值;

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-17

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金项目(18ZB0244, 16ZB0445)。

作者简介: 李萍(1974-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力电子及电力传动、电力系统保护与控制的研究。

e_{n-1} 为第 $n-1$ 次采样时刻设定电压与实际输出电压采样值的偏差值； k_p 为比例系数； k_i 为积分系数； k_d 为微分系数。

由于微分量在负载变化较大时，不合适的参数容易引起系统震荡，为此，本文选择 PI 算法进行调节，即 $k_d=0$ 。

某一次计算结束时刻，单片机输出 PWM 占空比为：

$$u_n = \Delta u + u_{n-1} = k_p(e_n - e_{n-1}) + k_i e_n + u_{n-1} \quad (2)$$

单片机每次计算结束时，记录当前计算的 PWM 占空比，下一次计算时刻时，该占空比即为 u_{n-1} 。

2 系统硬件组成

本文系统结构框图如图 1 所示，主要由辅助电源、MOS 驱动电路^[6]、同步降压斩波电路、输出电压采样电路、输出电流采样电路和单片机最小系统等组成。

该系统设计为 30 V 直流输入，MOS 驱动电压通常小于 20 V，因此设计 12 V 辅助电源用于 MOS 驱动和单片机电路。同步降压部分，采用上下管均为 N 型 MOS 管，高低边 MOS 驱动集成电压自举电路，能够更有效和便捷地驱动高低边 NMOS，本文采用英飞凌科技公司的 IR2113 集

成型高低边 MOS 驱动。STM32F334 内部集成运算放大器 and 高速比较器，为了减少调试中对 STM32F334 的损坏，本文均采用外部比较器和运算放大器。通过以上部分，即完成了拓扑结构设计。

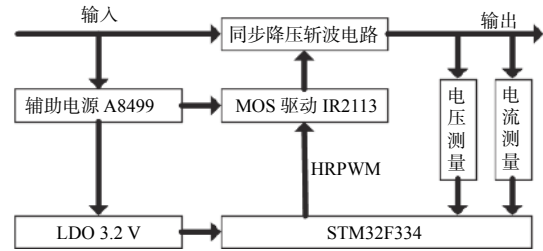


图 1 系统结构图

2.1 单片机最小系统设计

本文所采用的 STM32F334C8T6 最小系统如图 2 所示^[7]，图中包含单片机的供电脚退耦电路、外部高速晶振电路、复位电路等子模块电路。其中，STM32F334C8T6 的 VDDA 管脚直接给 DAC、ADC 等内部模拟电路供电，因此增加一个 π 型滤波器，即图 2 中的 C_3 、 L_1 和 C_4 ，这将有助于降低其他外围电路对 ADC 参考电压的影响。PWM 输出采用 STM32F334C8T6 加持的高分辨率定时器 (HRTIM1)。采用 HRTIM1 的通道 0 和通道 1，具有互补输出和死区时间控制。

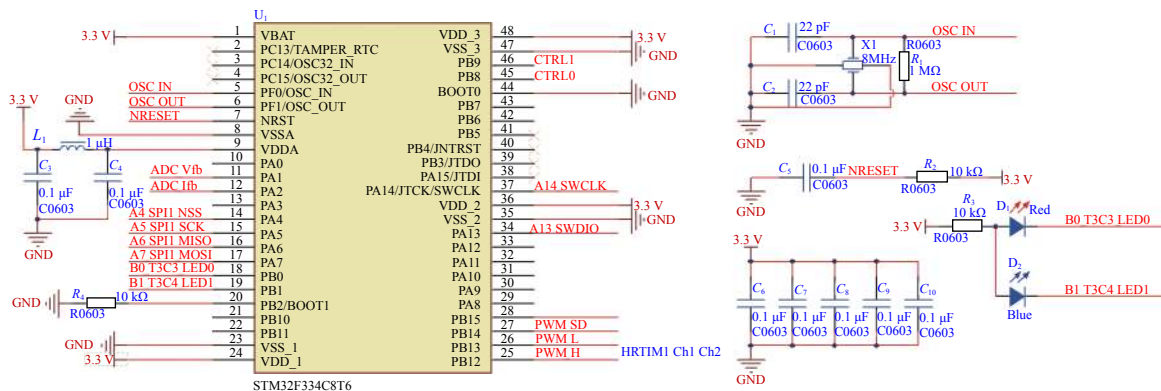


图 2 单片机最小系统

2.2 电源主回路及 MOS 驱动设计

如图 3 所示，电源主回路采用 Buck 同步整流设计，高边和低边均采用增强型 NMOS，续流通路采用 NMOS 替代简易的续流二极管设计，当 L_2 续流阶段时，电流从 GND 流过 Q_2 ，再流进 L_2 。续流电流直接通过低导通电阻、低导通压降的 Q_2 沟道中流过，并非从 Q_2 体二极管流过，有

利于提高转换效率和提高最大电流限制。Buck 的电路分析不再赘述。

MOS 驱动采用 IR2113，IR2113 是一个 600 V 高边和低边一体的栅极驱动器，具有关断功能。图 3 中， D_3 和 C_{12} 构成自举电路。假定某时刻， HIN 为低电平， LIN 为高电平，此时 Q_1 的 V_{GS} 为 0， Q_1 截止； Q_2 的 V_{GS} 为 12 V， Q_2 导

通; IR2113 的 6 号管脚 VB 为 0。12 V 通过 D_3 给 C_{12} 充电, 由于没有限流电阻, C_{12} 瞬间被充满。此时 C_{12} 两端电压为 12 V, 即 IR2113 的 VS 电压为 12 V。下一时刻, HIN 为高电平, LIN 为低电平, IR2113 中高边驱动的内部半桥上管导通, C_{12} 储存的 12 V 电压通过 IR2113 高边驱

动的内部半桥上管与 R_5 、 Q_1 的栅极形成导通环路, 此时 Q_1 导通, Q_1 的源极即 IR2113 的 VB 电压为输入电压 30 V, D_3 截止。此时 IR2113 的 VS 电压为 42 V, Q_1 的 V_{GS} 仍然等于 12 V。由于 C_{12} 的电容量远大于 Q_1 栅极源极电容, 因此 Q_1 可以持续导通。

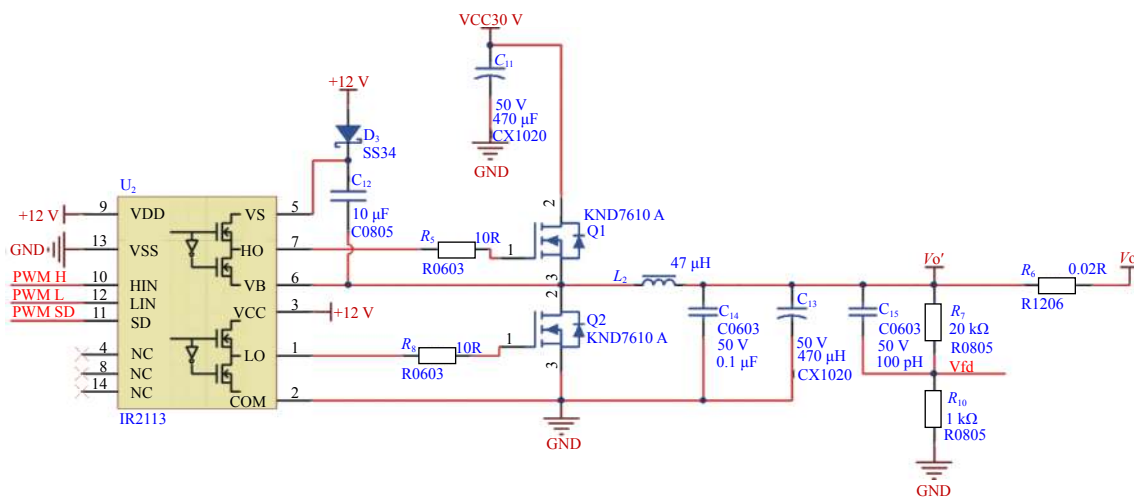


图3 电源主回路及 MOS 驱动设计

3 算法设计

为了使 PID 算法更加适合开关电源系统特定结构, 使系统更加稳定, 在使用第 1 小节介绍的增量式控制算法的同时对其进行相应改进与优化^[8]。

3.1 输出电压采样时刻点选择

MOS 在一个周期开通或关断时刻会产生大量的谐波, 选择 MOS 导通的中间作为 ADC 时间采样

点, 能够有效地避免谐波的干扰。打开 STM32F334 的 HRTIM 通道 3 的比较捕获中断开关, 当通道 1 的占空比大于 50% 时, 通道 3 的捕获比较寄存器的值为通道 1 的值的一半。当通道 1 的占空比小于 50% 时, 通道 3 的捕获比较寄存器的值应为自动重装寄存器值减去通道 1 的值的差值的一半。在此中断读取 ADC 电压, 将能得到合适的采样位置, 如图 4 所示。

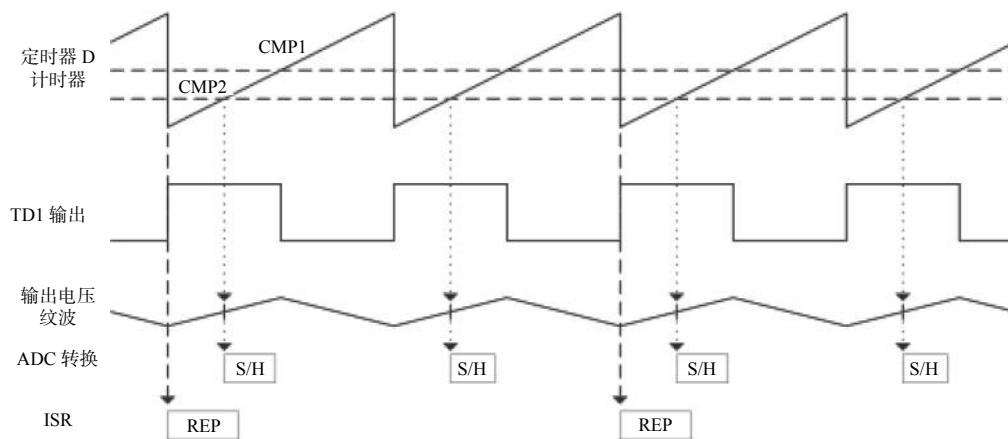


图4 输出电压、ADC 采样点波形图

3.2 积分分离法

积分作用能消除控制系统的静差, 也会引起积分饱和。为了克服积分饱和的现象, 采用积分

分离^[9]。积分分离法的基本思想是在偏差的绝对值 $|e_n|$ 大于 e_1 时不进行积分, 仅当偏差的绝对值 $|e_n|$ 小于某一预定的门限值 e_1 时, 才进行积分累积, 表达

式为:

$$K_I = \begin{cases} K_I & (|e_n| < e_1) \\ 0 & (|e_n| > e_1) \end{cases} \quad (3)$$

3.3 设置偏差死区

当系统稳定后, 仍然存在较小的偏差, 当较小的误差存在时, 误差已处于临界区域, 此时误差可正可负, 过多的临界区 e_n 计算容易造成系统震荡。因此, 当系统偏差的绝对值小于调节死区时, 强制设置 e_n 为 0, 当系统偏差的绝对值大于调节死区, PID 控制才发挥调节作用^[10], 表达式为:

$$e_n = \begin{cases} e_n & (|e_n| > e_0) \\ 0 & (|e_n| < e_0) \end{cases} \quad (4)$$

4 软件流程设计

该系统基于 STM32F334 控制器实现了数字式 PID 调节器的设计, 利用 HRTIME 定时器产生高分辨率 PWM。其主要的算法流程为: 在 HRTIME 通道 3 的捕获比较中断服务函数中, 读取 ADC 采样值。在 HRTIME 更新中断服务函数中, 按照式(2)计算 PID, 单片机得出占空比值, 将占空比换算为 HRTIME 的比较输出寄存器对应的参数, 使之输出对应占空比的 PWM。算法的软件流程图如图 5 所示。

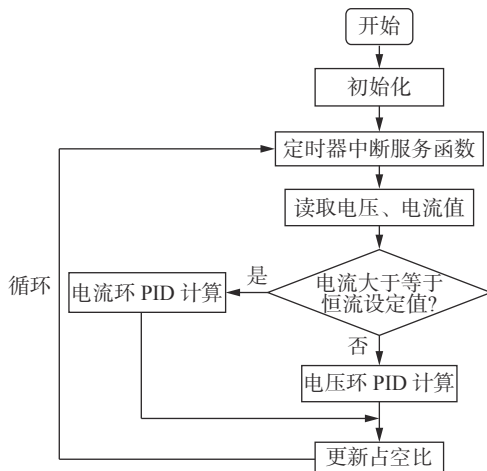


图 5 软件流程图

5 测试分析

5.1 输出响应测试

如图 6 所示, 在电源给电过程中, 电源输出电压, 输出电压的上升时间^[10]约为 80 ms。电源输出没有明显的尖峰和电压过冲, 说明 PID 整定参数适当^[11]。

5.2 输出测试

为了测试输出电压是否稳定和观察 PI 控制是否在输出稳定情况发生振荡情况, 利用串口输出 PWM 的占空比计数值, 实际为单片机的捕获比较寄存器的输入值。如图 7 所示, 为输入电压为 30 V, 输出电压为 12 V, 输出电流为 2 A 时 100 个 PWM 的计数值, 由图 7 发现 PWM 在 50 以内较小范围变化, 没有出现较大的震荡, 输出电压稳定。

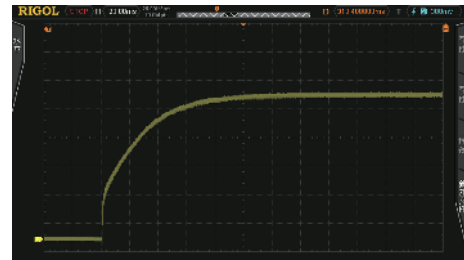


图 6 系统输出响应波形

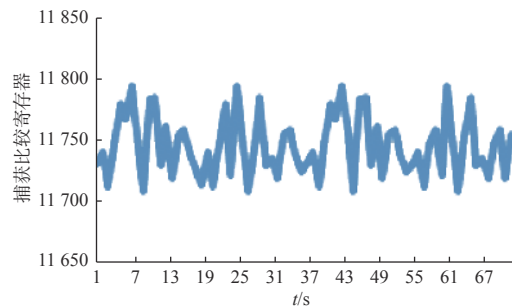


图 7 PWM 变化曲线图

5.3 效率测试

使用 30 V 直流电压输入, 设置恒流电压为 2.5 A, 将电子负载分别设定为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 A, 测量输入电压、输入电流等参数, 如表 1 所示, 经计算, 该数字电源在恒压模式, 不同负载功率下, 效率可达 92% 以上。

表 1 恒流测试数据

输入电压/V	输入电流/A	输出电压/V	输出电流/A	效率
30	0.214	12.02	0.5	93.6%
30	0.428	12.01	1.0	93.4%
30	0.644	12.00	1.5	93.1%
30	0.863	11.98	2.0	92.5%

5.4 恒流测试

调整 150 W 功率滑动变阻器, 使其阻值为 5 Ω 。使用 30 V 直流电压输入, 通过串口分别设置单片机的恒流^[12]电压为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 A。测量其

输出电压、输出电流等参数。如表2所示,在恒流模式中,STM32F334能够保证实际电流与设定电流误差小于5%,且电压输出稳定,不震荡。

表2 恒流测试数据

输入电压/ V	设定电流/ A	输出电压/ V	输出电流/ A	负载电阻/ Ω
30	0.5	2.49	0.495	5
30	1.0	5.15	1.022	5
30	1.5	7.82	1.553	5
30	2.0	10.49	2.071	5

6 结束语

本文同时使用了电流环和电压环,采用分时工作模式。当负载电流低于设定恒流电流时,电压环路工作,电流环路关闭,此时处于恒压模式。当负载电流约等于设定恒流电流时,电流环路工作,电压环路关闭,此时处于恒流模式。通过对电压环、电流环的PID整定,可以得到好的频率响应曲线。因此,该电路能够适应多种类型负载。

本文以具有Cortex-M4+FPU内核的STM32F334微处理器为控制核心,实现了Buck同步降压斩波电路的设计,对同步电路工作原理和传统的PI控制策略进行了优化和详细的阐述。经过多次实验测试,该系统具有输出稳定、响应速度快等优点。

参考文献

- [1] 孔维功. 基于数字控制Buck电路的DC-DC电源变换器仿究[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 33-38.
- [2] 徐杨. 提高同步整流Buck变换器轻载效率的数字化控制方案分析[J]. 电气技术, 2017(2): 14-19.
- [3] 白志刚. 自动调节系统解析与PID整定[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [4] VIJAYALAKSHMI S, RAJA A T S R. Time domain based digital PWM controller for DC-DC converter[J]. Automatika, 2015, 55(4): 434-445.
- [5] MARUTA H, MITSUTAKE D, MOTOMURA M, et al. Transient response of reference modified digital PID control DC-DC converters with neural network prediction[J]. Ieice Transactions on Communications, 2016, E99.B(11): 2340-2350.
- [6] 周润景. 常用驱动电路设计及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [7] 牟健. 基于STM32F334双向同步整流BUCK-BOOST数字电源设计[J]. 电子产品世界, 2018(9): 52-56.
- [8] 姜少飞. 基于DSP的数字PID控制在开关电源中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(6): 68-71.
- [9] 李耀贵. 基于积分分离+死区PID的逆变电路控制系统研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 100-104.
- [10] 程红丽. Buck变换器的数字电流滞环控制策略的改进[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(6): 812-818.
- [11] 张婧. 基于Matlab的PID控制器参数整定方法[J]. 实验科学与技术, 2016, 14(4): 37-40.
- [12] 邓晓千. 基于STM8s的数控直流恒流源的设计[J]. 实验科学与技术, 2017, 15(1): 33-35.

编辑 张俊

(上接第42页)

- [3] 姚培, 张李坚, 周晶香. 基于单片机控制的智能循迹避障小车[J]. 机电信息, 2010(12): 192-193.
- [4] 陈晖, 张军国, 李默涵. 基于STC89C52和nRF24L01的智能小车设计[J]. 现代电子技术, 2019(17): 20-23.
- [5] 索南尖措, 杨建, 周欢欢. 基于STC89C52单片机的智能小车的设计[J]. 信息安全与技术, 2007, 74(4): 69-71.
- [6] 赵煜, 陈鑫, 强彦. 一种语音控制的自主循迹与避障的智能小车的设计[J]. 电脑开发与应用, 2019(3): 39-41.
- [7] 薛红, 尹廷辉, 苏勇. 循迹智能小车的系统设计[J]. 军事通信技术, 2019(3): 74-77.
- [8] 马德希. 基于循迹避障控制系统的智能小车遥控设计[J]. 计算机产品与流通, 2019(9): 127.

- [9] 徐静, 李欣欣. 智能循迹避障小车的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(24): 191-193.
- [10] 赵春, 郭秀珍. 智能循迹避障小车的设计[J]. 内蒙古科技与经济, 2018, 418(24): 109.
- [11] 巫帮锡, 李政, 廖杰, 等. 循迹小车的设计与研究[J]. 科技与创新, 2019(18): 90-91.
- [12] 赵俊杰, 张艳芬, 崔凯. 基于STC89C52单片机控制的智能小车设计[J]. 电子制作, 2020(23): 26-27.
- [13] 苏晓峰, 王海涛, 程一平, 等. 自动循迹避障灭火智能小车设计[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(4): 134-135.
- [14] 杨帆, 雷迪. 基于STM32设计的避障小车[J]. 制造业自动化, 2021, 43(3): 40-43.

编辑 张俊