

基于STM32的简易直流电子负载设计

曹嘉豪, 金 海

浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月9日; 发布日期: 2022年6月16日

摘 要

本系统采用STM32单片机为核心, 采用PWM调制方法, 以串联型双路半桥DC-DC电路作为简易电子负载主电路, 实现简易直流电子负载。单片机根据测量电路获得的电流和电压采样反馈, 使用PID算法调节PWM波占空比, 控制IR2103驱动电路输出, 实现电子负载实现恒流和恒阻模式的稳定。系统实时测量并通过OLED显示电路的相关状态。经过多次实验测试, 本系统在恒流模式下能够稳定100~2000 mA的可调电流, 在恒阻模式下能够稳定10~100 Ω 的可调电阻, 且系统的各项误差均小于1%, 可以很好地应用于电源测试设备。

关键词

STM32, 双向DC-DC电路, 直流电子负载, PID算法, PWM

Design of Simple DC Electronic Load Based on STM32

Jiahao Cao, Hai Jin

School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 9th, 2022; published: Jun. 16th, 2022

Abstract

This system adopts STM32 microcontroller as the core and uses PWM modulation method to realize simple DC electronic load by using series type dual half-bridge DC-DC circuit as the main circuit of simple electronic load. Based on the current and voltage sampling feedback obtained from the measurement circuit, the microcontroller uses the PID algorithm to adjust the PWM wave duty cycle and control the IR2103 driver circuit output to realize the electronic load to achieve constant current and constant resistance mode stability. The system measures and displays the relevant status of the circuit via OLED in real time. After several experimental tests, this system can stabilize the

adjustable current of 100~2000 mA in constant current mode and the adjustable resistance of 10~100 Ω in constant resistance mode, and all the errors of the system are less than 1%, which can be well applied to power supply test equipment.

Keywords

STM32, Bidirectional DC-DC Bircuit, DC Electronic Load, PID Algorithm, PWM

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在电力电子实验中经常要对电源设备的输出特性进行测试, 传统的测试方法中主要采用电阻或滑动变阻器等器件充当测试负载, 存在检测时间长、检测流程复杂的问题[1]。除此之外, 传统电阻负载不能满足当前对负载的多种需求, 如恒定电流的负载、带输出端口的负载和动态负载等。而电子负载能够适应复杂电路的要求, 特别是在传统负载不能解决的用恒定电压吸收电流和用恒定电流吸收电压等应用中, 更能彰显其优越性[2]。本设计基于 STM32 控制芯片, 设计出一款可满足不同负载特性要求的简易直流电子负载。可设置恒定电流范围 100~2000 mA 和恒定电阻范围 10~100 Ω 内任意可调, 通过矩阵键盘精确设置需要恒定的电流值和电阻值, 并通过 OLED 实时显示实际的电流值和电阻值。本设计实现了电源测试过程的动态化检测, 简化了测试流程, 并且能直观地显示测试结果, 能够解决目前电源测试设备面临的问题[3]。

2. 简易直流电子负载总体设计

本系统由 STM32 单片机控制模块、串联型双路半桥 DC-DC 变换器主电路、IR2103 驱动电路模块、直流电压采样模块、INA282 直流电流采样模块、OLED 显示模块、辅助电源等部分组成。系统输入端为直流稳压电源, MC34063 和 XL6009 辅助电源模块从输入端取电, 为单片机控制电路和电压、电流检测电路供电。单片机通过 I/O 端口产生 PWM 波, 经过 IR2103 电路, 驱动电子负载主电路。系统采用具有宽共模输入、高抗共模信号能力 INA282 电路采集电流, 采用分压电阻采集电压, 将采样信号反馈至单片机实现闭环控制。单片机调用 PID 算法, 根据采样值调节 PWM 波的占空比, 从而实现恒流和恒阻的工作模式, 并实时测量和显示当前电路状态, 可以很好地用于电源设备的特性测试。系统总体设计如图 1 所示。

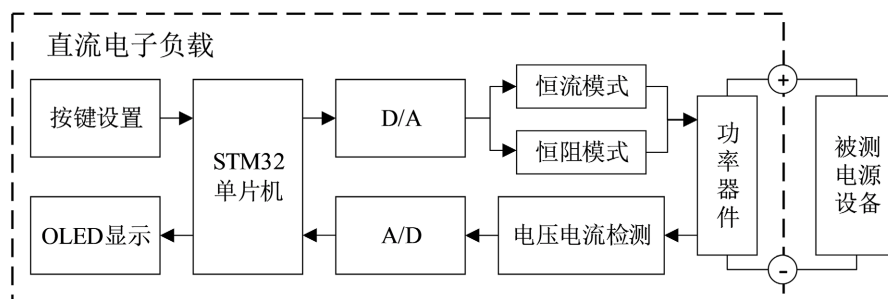


Figure 1. Overall system design framework

图 1. 系统总体设计框架

3. 系统硬件设计

3.1. 直流电子负载主电路

本系统采用串联型双路半桥 DC-DC 电路作为主电路, 主电路拓扑图如图 2 所示。主电路采用 BOOST-BUCK 的拓扑结构, 电感电流在断续和连续模式下具有保持变压比始终不变的特性, 便于系统动态调节。系统从 U_i 输入电压, 左半部分电路工作在 BOOST 模式下, 实现升压功能; 右半部分电路工作在 BUCK 模式下, 实现降压功能。电路中的 MOS 管选用 IRF540, 由于其漏源极击穿电压为 100 V, 可以保证输入电压改变时 MOS 管处于正常工作状态。由于漏源极导通阻抗低于 75 m Ω , 减小 MOS 管导通损耗, 可提高系统效率。为减小 MOS 管通断时的损耗, 消除密勒效应的影响[4]。

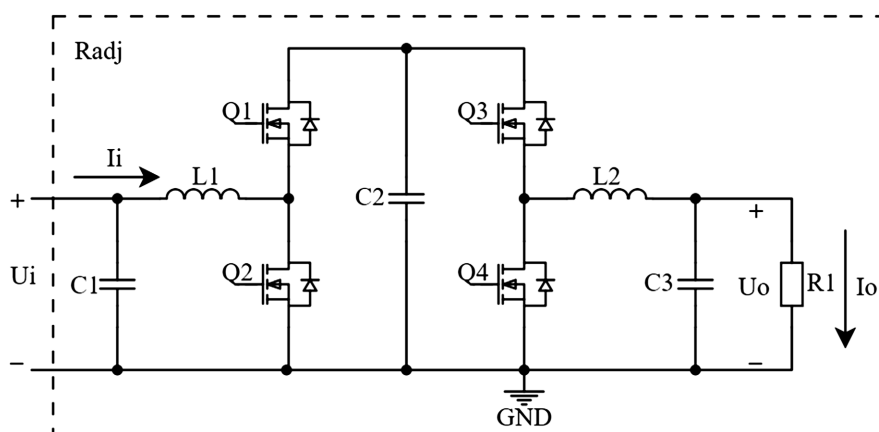


Figure 2. Series-connected dual half-bridge DC-DC main circuit topology

图 2. 串联型双路半桥 DC-DC 主电路拓扑

图中, U_i 为电子负载的输入电压, I_i 为输入电流, U_o 为定值电阻 R_1 两端的电压, I_o 为输出电流, 由此可以得到电子负载的等效电阻 R_{adj} :

$$R_{adj} = \frac{U_i}{I_i} \quad (1)$$

根据功率守恒定律可得:

$$U_i I_i = \frac{U_i^2}{R_{adj}} = \frac{U_o^2}{R_1} \quad (2)$$

对于恒流型电子负载, 要求保持 I_i 恒定, 即当 U_i 变化时, I_i 保持不变。由式(2)的关系可知, 为了实现 I_i 的恒定, 当 U_i 增大或减小时, 需要增大或减小 U_o 以保证等式的成立。通过调整开关管的占空比来改变升降压斩波电路的电压增益, 从而使 U_o 随 U_i 同向变化, 最终实现负载端输入电流恒定的功能。

对于恒阻型电子负载, 要求保持等效电阻 R_{adj} 不变, 即当 U_i 变化时 R_{adj} 维持恒定。由式(2)的关系可知, 为了实现 R_{adj} 的恒定, 当 U_i 增大或减少时, 需要增大或减少 U_o 。以保证等式的成立。通过调整开关管的占空比来改变升降压斩波电路的电压增益, 从而使 U_o 随 U_i 同向变化, 最终实现负载端等效电阻恒定的功能。

综上所述, 电子负载最终实现恒流和恒阻的工作模式均是通过调节开降压斩波电路的电压增益实现。

3.2. 主控单片机的选用

本设计采用 STM32 为本系统的主控单片机, 实现系统的控制功能。STM32 芯片具有 72 MHz 的运算速度和高达 1 MB 的闪存, 是低功耗、高性价比、高性能的 ARM Cortex-M 内核的 32 位微控制器。STM32

单片机外设丰富, 功能齐全, 具有 112 个快速 I/O 端口、13 个通信接口、11 个定时器、3 个 12 位的 us 级的 A/D 转换器和 2 个通道 12 位的 D/A 转换器[5]。同时具有电源管理电路, 处理器运行电压范围为 2~3.6 V, 并且具有多种复位保护功能。从电路系统性能上看, STM32 单片机的运算速度快且携带的功能多, 使用方便。而电路对精度要求比较高, 单片机的 ADC 采样是 12 位采样, 采样位数足够, 性价比高。基于单片机自身性能和系统所需功能的考虑, 采用 STM32 作为本系统的主控单片机。

3.3. 驱动电路

系统采用 IR2103 电路来驱动两路 DC-DC 变换器。IR2103 芯片为半桥式 MOSFET 栅极驱动器, 通过自举电容和二极管理提供充电电压, 同时该芯片具有固定的死区时间, 防止上下 MOS 管同时导通击穿电路[6]。芯片供电电压选择 12 V, 能够保证输出电压达到驱动 MOS 管的电压值。在输入电源与地之间接入电解电容 C_1 , 起滤波作用。二极管 D_1 和电容 C_2 是自举二极管和自举电容, 自举电路等效于 BOOST 升压电路。在开关频率很高的情况下, 通过使用自举升压二极管、自举升压电容等元件, 将电容放电电压和电源电压叠加, 从而实现输出电压抬升。IR2103 驱动电路如图 3 所示。

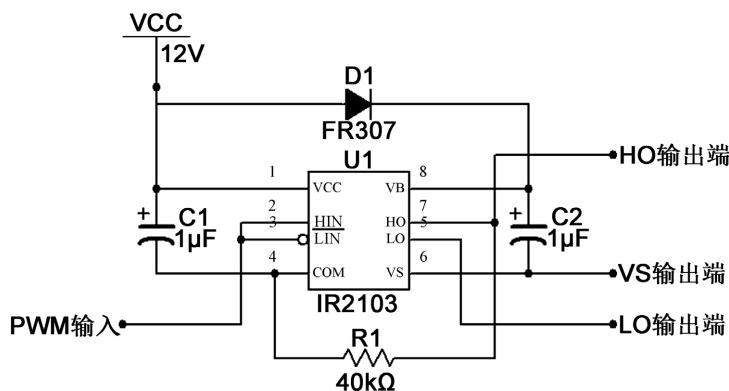


Figure 3. IR2103 driver circuit
图 3. IR2103 驱动电路

3.4. 采样电路

本系统要实现闭环控制, 需要采集电子负载电压和电流送至单片机调整 PWM 波占空比实现稳定输出。STM32 单片机可直接采集直流电压, 故电压采样电路采用易实现的大电阻并联分压电路, 将输出电压按一定分压比转换送入单片机 A/D 采样口。电流采样电路采用以 INA282 为核心的电路。INA282 是高精度、宽共模范围、零漂移的电流监视器, 对差分输入的信号具有 50 倍固定增益的放大输出[7]。为使其增益完全位于线性区, 将两个基准电压值分别接于电源电压和地。采样电阻 R_s 采用电阻极小、温漂低的康铜丝。电流经过康铜丝转换为微弱的电压, 经芯片放大后能够准确地表现出电路中微小的电流变化。INA282 电流采样电路如图 4 所示。

3.5. 辅助电源

本系统需要辅助电源为 STM32 单片机、IR2103 驱动电路和 INA282 电流采样电路独立供电。采用基于 MC34063 和 XL6009 的辅助电源电路从输入的直流电压取电。该电路将输入端的直流电压输入 MC34063 电路, 得到稳定的 5 V 直流电压, 再送入 XL6009 电路, 得到稳定的 12 V 直流电压。该辅助电源所使用的外设较少, 电路占用空间小, 集成度高, 便于电路的设计和布局, 并且对输入电压的调整能力强, 带载能力强, 输出电压稳定, 功耗小, 效率高。

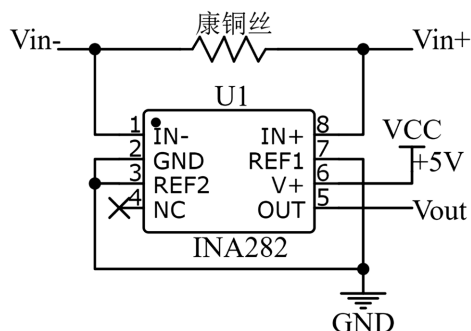


Figure 4. INA282 current sampling circuit

图 4. INA282 电流采样电路

4. 系统软件设计

4.1. 软件整体设计

本系统选用高性能的 STM32 单片机作为直流电子负载的核心主控模块。软件开发环境选用 Keil5 软件，编程语言选用 C 语言。本系统软件程序采用模块化方式设计，包括按键检测、多通道 ADC 采样和 PWM 波占空比实时调整程序等。单片机的计算速度可以达到每秒约 30 千次，使电源的稳定性大大提高。系统通过定时器 Timer1 产生 PWM 波控制左半部分的 BOOST 电路，通过定时器 Timer2 控制右半部分的

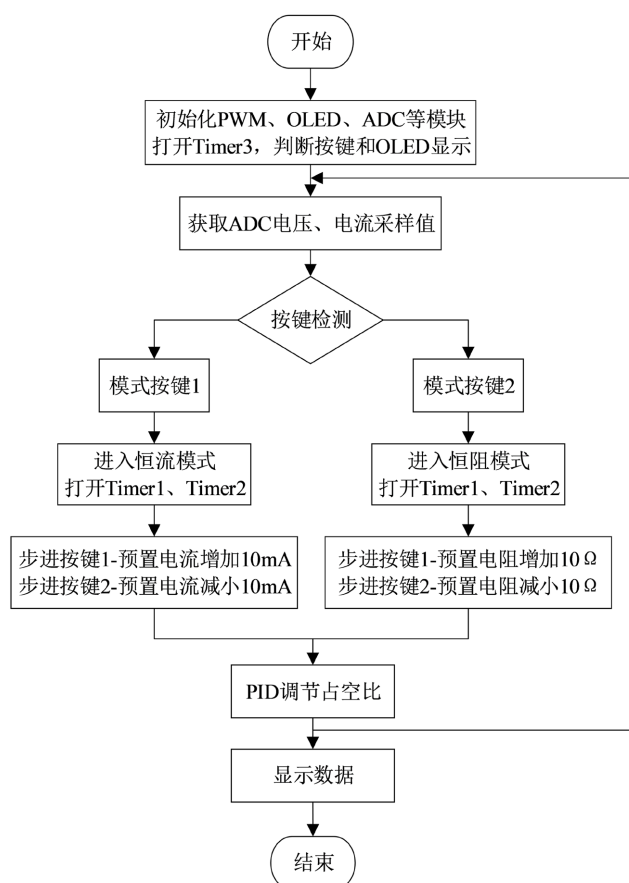


Figure 5. Overall framework of software design

图 5. 软件设计整体框架

BUCK 电路, 从而调节两部分 DC-DC 电路的调制比。系统通过定时器 Timer3 读取按键和 OLED 显示, 采用矩阵键盘设定恒定电流值或恒定电阻值, OLED 实时显示系统状态。单片机不断检测与采样端口, 一旦检测到信号改变, 执行相应的子程序, 控制 PWM 波的占空比, 从而实现电子负载的电流或电阻稳定。系统软件设计整体流程图如图 5 所示。

4.2. PID 算法

PID 算法控制是设计控制器时最常用、最经典的控制方式, 在电气与自控领域有非常广泛的应用 [8]。在稳定电子负载的电流和电阻均使用 PID 调节控制, 在系统闭环控制系统中能发挥稳定作用。它的原理易理解, 离散的数据也让计算更加容易, 且只需要确认三个参数, 积分参数电路控制一般是用不到的, 应用最多的是比例微分调节, 所以其具有参数选定比较简单的优点。PID 控制的基本原理如图 6 所示。

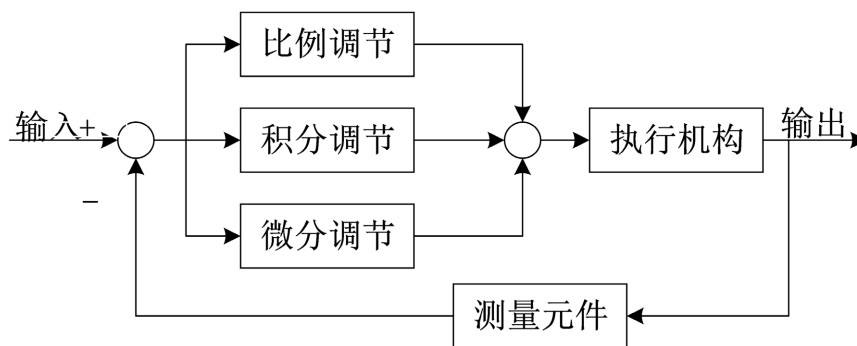


Figure 6. PID control schematic
图 6. PID 控制原理图

本设计的电压和电流采样电路将采样值送至单片机, 将其与设定值比较, 并利用 PID 算法调节实现恒流和恒阻。因此, 电子负载的稳定性很大程度上受设置的 PID 参数影响。由图 6 可知, 我们需要设置比例系数、积分系数和微分系数, 且这些计算关系都是利用输出值与基准值之间的误差进行分析。对于离散的情况, 积分是一个累加, 微分是前后两项输入值之差, 而比例是直接对误差进行处理。

经典 PID 算法公式为:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_0^k e(n) + k_d (e(k) - e(k-1)) \quad (3)$$

式中, k_p 表示比例增益, k_i 表示积分时间常数, k_d 表示微分时间常数, $e(n)$ 表示输出信号, $e(k)$ 表示采样值与基准值的差值, 即误差。

4.3. PWM 调制技术

串联型双路半桥 DC-DC 电路的输出电压大小不仅直接与输入电压相关, 也与控制 MOS 管通断周期的 PWM 波占空比有关。单片机在输入电压稳定的情况下, 通过 I/O 端口输出 PWM 控制信号, 驱动电路中的 MOS 管来实现稳定输出电压。STM32 通过 ADC 通道获取采样电压, 在短时间内多次采样取平均值, 从而得到相对准确的采样值。单片机从 I/O 端口接收反馈的电压信号, 通过 A/D 转换为数字信号的采样值进行比较。由于硬件电路内部自带噪声, 会产生不可避免的误差。系统通过步进加减改变 PWM 波占空比, 使反馈值不断逼近计算结果得到的 A/D 值, 而反馈得到的 A/D 值进入程序重复自动调整, 最后在较小区间内稳定波动。以 BOOST 电路为例, 当检测到输出电压小于设定的基准值, 则

减小 PWM 波占空比；当检测到输出电压大于设定的基准值，则增大 PWM 波占空比。PWM 调制算法流程图如图 7 所示。

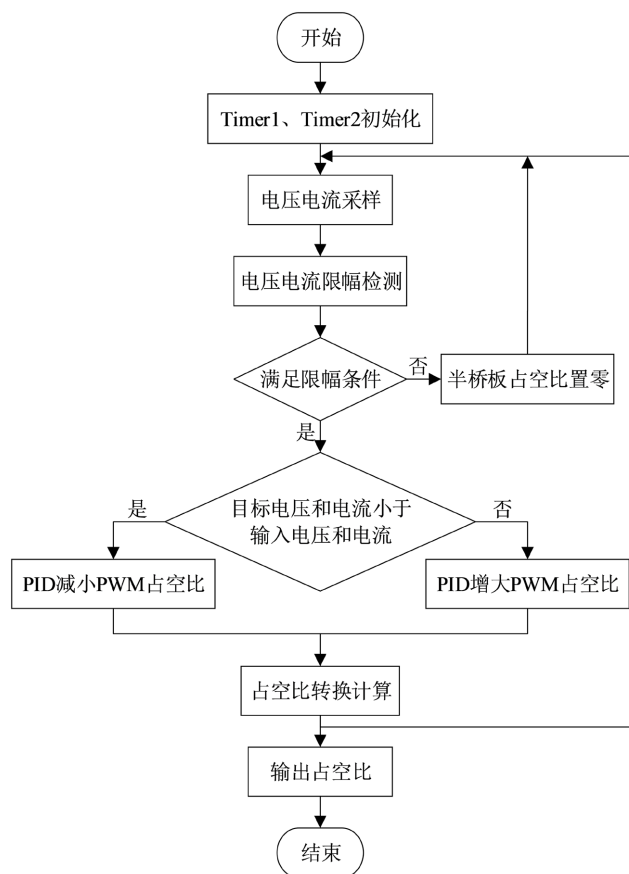


Figure 7. PWM modulation algorithm flow chart
图 7. PWM 调制算法流程图

5. 测试方案与结果

输入端接上稳压直流电源，实现输入电压 U_i 在 10~20 V 范围内可调，功率器件采用 $5\ \Omega$ 的大功率电阻负载。设定系统的两种工作模式，分别为恒流模式和恒阻模式。由于系统根据采样值实时调整 PWM 占空比，故测试数据在小范围内稳定波动，记录测试平均结果。

测试结果

1) 恒流模式的电流设置范围 100~2000 mA，设置分辨率为 10 mA，并实时测量和显示流过电子负载的电流，结果见表 1。

Table 1. Constant current mode preset current test records

表 1. 恒流模式预置电流测试记录

预置电流/mA	实际电流/mA	相对误差/%	显示电流/mA	测量误差/%
100	100.6	0.6	100	0.59
300	297.9	0.7	299	0.37

Continued

500	495.6	0.88	498	0.69
700	699.5	0.07	699	0.07
1000	999.8	0.02	1001	0.12
1500	1497.3	0.18	1499	0.11
2000	1998.9	0.06	2000	0.06

根据测试记录表, 系统稳定工作在恒流模式, 且相对误差和测量误差均低于 1%。

2) 恒流模式下, 当电子负载两端电压变化 10 V 时, 测试电流变化情况, 结果见表 2。

Table 2. Constant current mode electronic load voltage change of 10 V when the current change records

表 2. 恒流模式电子负载两端电压变化 10 V 时电流变化记录

预置电流 /mA	输入电压 U_1/V	实际电流 I_1/mA	输入电压 U_2/V	实际电流 I_2/mA	电流变化绝对值 I_3/mA	电流变化率%
100	20	100.6	10	100.3	0.3	0.3
300	20	201.1	10	200.7	0.4	0.2
500	20	499.7	10	498.9	0.8	0.16
700	20	698.5	10	699.1	0.6	0.09
1000	20	999.8	10	1000.6	0.8	0.08
1500	20	1501.3	10	1498.8	2.5	0.17
2000	20	2002.2	10	1997.6	4.6	0.23

根据测试记录表, 改变电子负载两端电压时, 系统恒流稳定, 且电流变化率低于 1%。

3) 恒阻模式的电阻设定范围 10~100 Ω , 设置分辨率为 10 mA, 并实时测量和显示电子负载电阻值, 结果见表 3。

Table 3. Constant resistance mode preset resistance test records

表 3. 恒阻模式预置电阻测试记录

预置电阻/ Ω	负载电压/V	负载电流/mA	电压电流之比/ Ω	相对误差/%	显示电阻/ Ω	测量误差/%
10	20	2001.3	9.994	0.06	10	0.06
30	20	667.2	29.976	0.08	30	0.08
50	20	399.8	50.025	0.05	50	0.05
70	20	284.9	70.2	0.29	70	0.28
100	20	201.7	99.157	0.84	99	0.16

根据测试记录表, 系统稳定工作在恒阻模式, 且相对误差和测量误差均低于 1%。

4) 硬件实物图如图 8 所示。

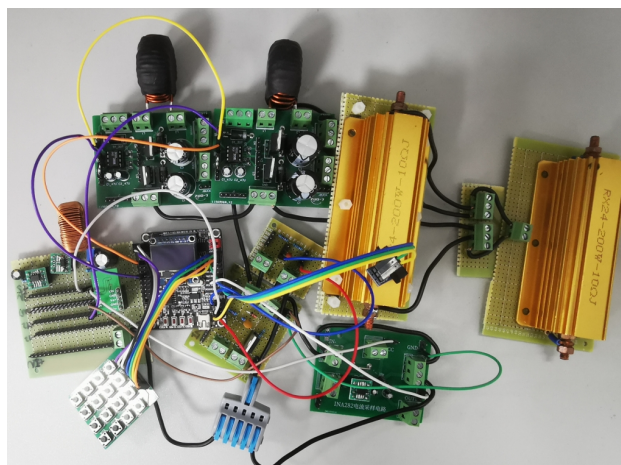


Figure 8. Overall circuit physical picture
图 8. 整体电路实物图

6. 结论

本文设计了一款基于 STM32 的简易直流电子负载, 并详细介绍了各硬件电路和软件程序的设计思路。系统通过对负载两端的电压和输出电流采样, 采用控制简单的 PID 算法调节 PWM 占空比, 从而稳定电子负载状态。通过多次实验测试, 系统能够实现恒流模式下 100~2000 mA 电流稳定可调和 10~100 Ω 电阻稳定可调, 并且精确显示电子负载实际值。本文所设计的系统检测速度快、检测效率高, 能够满足不同电源测试负载特性要求, 可以很好地解决电源测试设备面临的问题。

参考文献

- [1] 夏桂书. 基于 STC 单片机的智能电子负载[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(3): 115-130.
- [2] 刘磊. 基于 MSP430 单片机的直流电子负载设计[J]. 电子科技, 2013, 26(2): 25-27.
- [3] 王成智. 单相电力电子负载研究与设计[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [4] 崔建国, 宁永香. 消除密勒电容实现光电耦合器快速工作的研究[J]. 山西电子技术, 2020(4): 91-93.
- [5] 厉俊, 郑佳蕙. 基于 STM32 的开关电源模块并联供电系统[J]. 软件工程, 2020, 23(3): 4-8.
- [6] 徐贵鑫, 许金字, 王利斌, 金海. 基于 STM32 的单相不间断式 UPS 电源设计与实现[J]. 软件工程与应用, 2021, 10(3): 302-310. <https://doi.org/10.12677/SEA.2021.103034>
- [7] 张西晨, 徐颖捷, 包齐栋. 基于 STM32 的简易数控直流稳压电源系统的设计[J]. 软件工程与应用, 2021, 10(3): 354-364. <https://doi.org/10.12677/SEA.2021.103040>
- [8] 柳彦钊. 基于 STM32 的数控开关电源设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2019.