

基于STM32的单相不间断式UPS电源设计与实现

徐贵鑫, 许金字, 王利斌, 金海

浙江理工大学, 信息学院, 浙江 杭州
Email: 1570608432@qq.com

收稿日期: 2021年3月16日; 录用日期: 2021年6月9日; 发布日期: 2021年6月16日

摘要

本设计采用STM32单片机作为主控芯片, 产生一路PWM波和双路互补的SPWM波, 以全桥逆变电路为核心电路, 实现单相不间断式UPS电源。采用以IR2103芯片和IR2110芯片为主的驱动电路驱动双向DC-DC电路和全桥逆变电路中的MOS管。电路使用高精度芯片AD637采集交流电压反馈至单片机通过PID算法调节PWM波输出的占空比。本电源输出电压较为稳定, 负载调整率和电压调整率均在1%以下, 且正弦波波形失真度在2%以下。本电源在交流供电时能够输出稳定30 V的交流电压, 电流输出范围为1 A~2 A。直流供电时输出交流电压为30 V, 电流在1 A左右, 效率达到85%以上。

关键词

STM32单片机, 双向DC-DC电路, 全桥逆变电路, UPS, 单相逆变

Design and Implementation of Single-Phase Uninterrupted UPS Power Supply Based on STM32

Guixin Xu, Jinyu Xu, Libin Wang, Hai Jin

School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang
Email: 1570608432@qq.com

Received: Mar. 16th, 2021; accepted: Jun. 9th, 2021; published: Jun. 16th, 2021

Abstract

STM32 single chip microcomputer (SCM) is used as the main control chip to generate one PWM

wave and two complementary SPWM waves. The full-bridge inverter circuit is used as the core circuit to realize single-phase uninterrupted UPS power supply in this design. The drive circuit mainly composed of IR2103 chip and IR2110 chip is used to drive MOS transistors in bidirectional DC-DC circuit and full bridge inverter circuit. The circuit uses the high-precision chip AD637 to collect AC voltage and feed it back to the SCM to adjust the duty ratio of PWM wave output through PID algorithm. The output voltage of this power supply is relatively stable, the load regulation rate and voltage regulation rate are both below 1%, and the distortion of sine wave waveform is below 2%. The power supply can output a stable AC voltage of 30 V when supplying AC power, and the current output range is 1 A~2 A. When DC power is supplied, the output AC voltage is 30 V, the current is about 1 A, and the efficiency reaches more than 85%.

Keywords

STM32 Microcontroller, Two-Way DC-DC Circuit, Full-Bridge Inverter Circuit, UPS, Single-Phase Inverter

Copyright © 2021 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

随着计算机、网络、通信技术的发展,国民经济、国防军工、政府部门的各个领域要保障计算机网络系统的安全、可靠运行,就离不开 UPS 不间断电源[1]。由于市电供电存在不稳定、不可控等因素,因此,设计不间断式 UPS 电源供电,在市电停电时提供不间断供电电源[2],在许多领域都提供了很大的帮助。本设计选用 STM32 单片机为控制芯片,以单相全桥逆变电路为核心电路输出 50 Hz 正弦交流电。选择双向 DC-DC 电路作为辅助电路模块,用以控制全桥逆变电路的输入电压。并使用继电器和二极管控制交流电和直流电的同时接入,保证了供电的快速切换,提高了电路的输出效率。单片机提供 PWM 波和双路互补的 SPWM 波分别控制双向 DC-DC 电路和单相全桥逆变电路,同时对输出的交流电压采样,反馈至单片机控制双向 DC-DC 电路模块,最终控制电源输出正弦交流电压的稳定。

2. UPS 电源系统总体设计

本电源设计由整流电路模块、双向 DC-DC 电路模块、全桥逆变电路模块、单片机控制模块、交流电压采样模块、辅助电源模块等部分组成。交流供电时,220 V 市电经过自耦和隔离变压器输出 29 V~43 V 可变交流电,再经过整流滤波电路得到直流电,直流电经过双向 DC-DC 电路,通过单片机产生 PWM 波经过 IR2103 驱动两个 MOS 管得到稳定的升压直流输出电,升压直流电经过 DC-AC 全桥逆变电路,通过单片机产生两路反向互补的 SPWM 波接入 IR2110 芯片输出四路 SPWM 波,四路 SPWM 波推挽驱动全桥逆变结构中的四个 MOS 管的导通和截止得到正弦交流电[3]。利用高精度芯片 AD637 作为采样芯片采集输出的交流电压反馈至单片机进行闭环控制,通过调节 PWM 波的输出占空比控制双向 DC-DC 电路的升压,稳定升压直流电,经过逆变最终输出稳定的 50 Hz、30 V 的正弦交流电。单片机内部使用 PID 算法,根据反馈的电压实时控制输出电压的稳定。通过 OLED 显示屏实时显示采集的电压值和输出的 PWM 波占空比。断开交流电时,单片机通过 ADC 采样整流之后的直流电压,进而控制继电器的关断,电路瞬间切换到 24 V 直流稳压电源供电,同时通过内部的 PID 算法快速调节输出电压,保证了 UPS 电源的效率和输出电压的稳定。系统总体设计如图 1 所示:

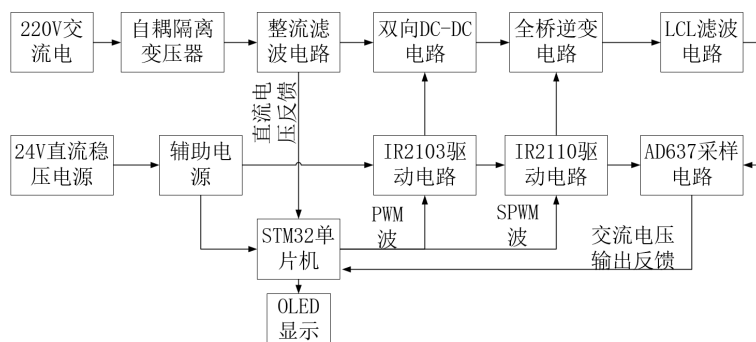


Figure 1. Overall system design diagram
图 1. 系统总体设计图

3. 系统硬件设计

3.1. 整流滤波电路

整流滤波电路由桥式整流电路和电解电容构成，桥式整流电路是通过二极管的单向导通特性将交流电转换为单向的直流电，经过电容滤波作为后续双向 DC-DC 电路输入。桥式整流滤波电路中，二极管截止时承受的最大反向电压 $U_{rm} = \sqrt{2}U_i$ ，其中 U_i 为交流输入电压，在本系统中， U_i 输入范围为 29 V~43 V，二极管承受最大反向电压约为 60.8 V。整流二极管选用 FR307，此二极管的各种参数均满足此次设计需求。其最大承受反向电压为 1000 V，最大正向平均整流电流为 3 A，但由于整流后的直流电其脉动成分较大，不便于后续使用，因此采用电容滤波，其特点为输出直流电压较高，纹波较小，但由于一级滤波效果较差，因此采用两个电解电容并联加强其滤波效果。

3.2. 双向 DC-DC 电路

双向 DC-DC 电路采用 BUCK-BOOST 电路拓扑，具备升降压双向变换功能。当从 U_i 输入电压时，电路工作在 BOOST 模式下，实现升压功能。电感 L 的储能作用使 U_o 电压泵升，经过电容 C2 稳压之后，可使输出电压高于输入电压[4]，即 $U_o > U_i$ 。MOS 管选择 IRFP250N，其漏源极击穿电压为 200 V，漏源导通电阻仅为 75 mΩ，其较高的击穿电压保证了 MOS 管的安全，较小的导通电阻可以减小 MOS 管的导通功耗，提高整个系统的效率。因为 MOS 管寄生电容的存在，在 MOS 管打开或关闭的时候，要对电容进行充电，瞬间电流较大。为减小 MOS 管开关时的损耗，在极前串联一个 10 Ω 电阻，减小开关瞬时电

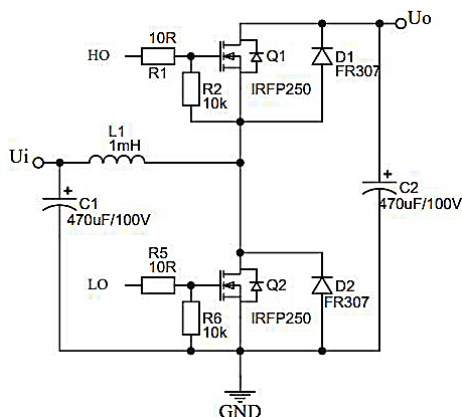


Figure 2. Bidirectional DC-DC circuit diagram
图 2. 双向 DC-DC 电路图

流。此外还在 GS 极之间并联一个 10 kΩ 电阻，其一是为了把 G 极拉低，这样使 MOS 管 G 极为低电平，不会造成开机时没 PWM 波输出情况下 MOS 管因 G 极悬空而导通。其二是作泄放电阻使用，使 MOS 管 G 极上的电荷在开关周期内能迅速释放，起到加速关闭作用。双向 DC-DC 电路如图 2 所示。

3.3. 逆变电路

逆变电路主要由全桥逆变电路和滤波电路组成。对于主电路 MOS 管的选择，考虑到效率，器件损耗程度，导通时间长短等问题，选择与上述双向 DC-DC 相同的 IRFP250N MOS 管。系统通过四路 SPWM 控制信号分别控制 Q1、Q2、Q3、Q4 四个 MOS 管，在一个周期内得到完整的正弦波输出。此外由于 MOS 管自身的寄生二极管耐压值和耐流值都不确定，需要在 MOS 管上再并联一个二极管，一方面可以防止源极电压过大烧坏 MOS 管，另一方面起到续流的作用，防止 MOS 管截止时产生的高压将其击穿。经过全桥逆变电路变换之后得到的波形并不是标准的正弦波，含有丰富的高频分量，需要设计合适的滤波电路。考虑到正弦波输出频率为 50 Hz，因此我们使用 LC 滤波器为逆变器滤波，经测试，将电感分为两部分的滤波效果要明显好于单个电感。滤波器参数设计公式如下：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \#(1)$$

其中 f_r 为截止频率， L 和 C 分别为电感值和电容值，本电源的输出交流电压频率为 50 Hz，因此将截止频率设为 100 Hz 左右。在实际设计中，由于实验器材的限制，选用 10 μF 的 CBB 电容和两个 4 mH 的电感，根据公式计算出截止频率大约为 550 Hz。全桥逆变电路如图 3 所示。

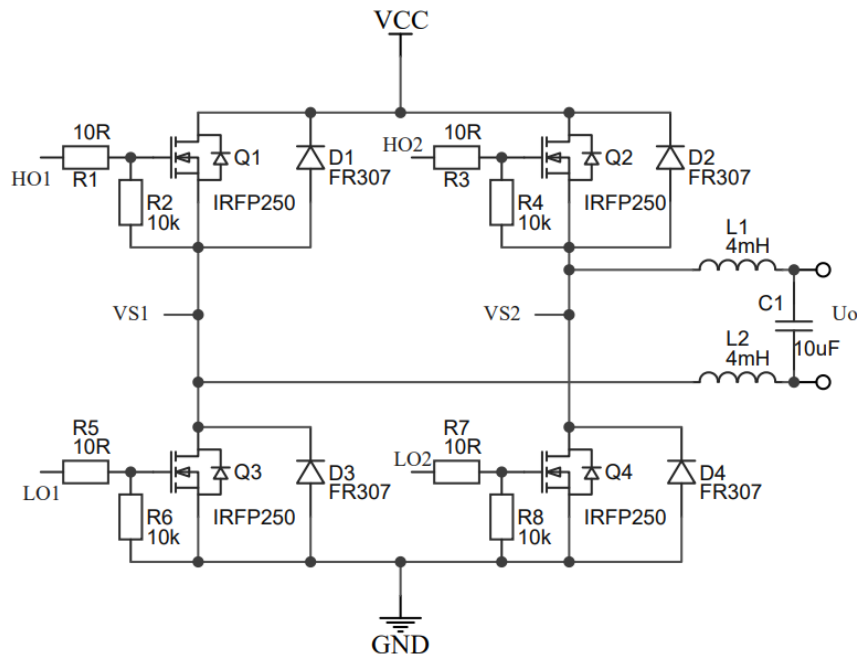


Figure 3. Full-bridge inverter circuit diagram
图 3. 全桥逆变电路图

3.4. 驱动电路

由于单片机产生的 PWM 信号电流较小，不具备驱动功率开关管的能力，故额外加入驱动电路才能开启 MOSFET 的栅极电压[5]。

采用 IR2103 驱动双向 DC-DC 电路, 该芯片是一个半桥式 MOSFET 栅极驱动器, 通过自举电容和二极管提供充电电压, 同时该芯片具有固定的死区时间, 避免了上下管同时导通导致短路[6]。IR2103 的 Ho 的输出信号是 Hin、Lin 两者相与的结果, Lo 的输出信号是 Hin、Lin 两者或非的结果, 因此将 Hin 和 Lin 相连并接入单片机的 PWM 信号, 则输出信号 Ho 与 PWM 信号相同, 输出信号 Lo 与 PWM 信号互补。

采用 IR2110 驱动全桥逆变电路, 驱动原理与 IR2103 大致相同, 采用自举电路和电平转换技术, 使逻辑电路对功率器件的控制要求降低, 每对 MOSFET(上下管)可以共用一片 IR2110 [7]。其输出信号 Ho 与输入信号 Hin 相同, 输出信号 Lo 与输入信号 Lin 相同。即单片机给 Hin 和 Lin 一对互补波形, 输出 Ho 与 Lo 也是一对互补波形。IR2110 驱动电路如图 4 所示。

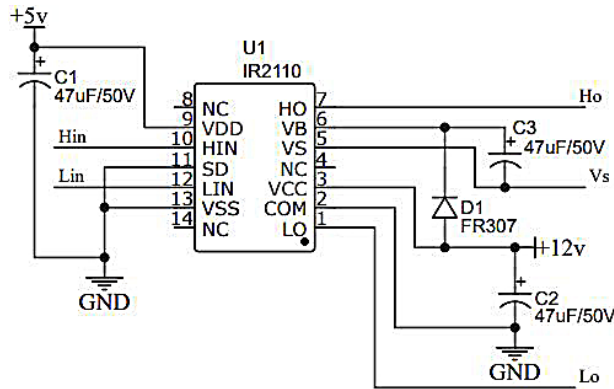


Figure 4. IR2110 driver circuit diagram
图 4. IR2110 驱动电路图

3.5. 采样电路

本系统需要做到闭环控制, 及时采集输出电压到单片机调整 PWM 波占空比进而稳定输出, 由于本

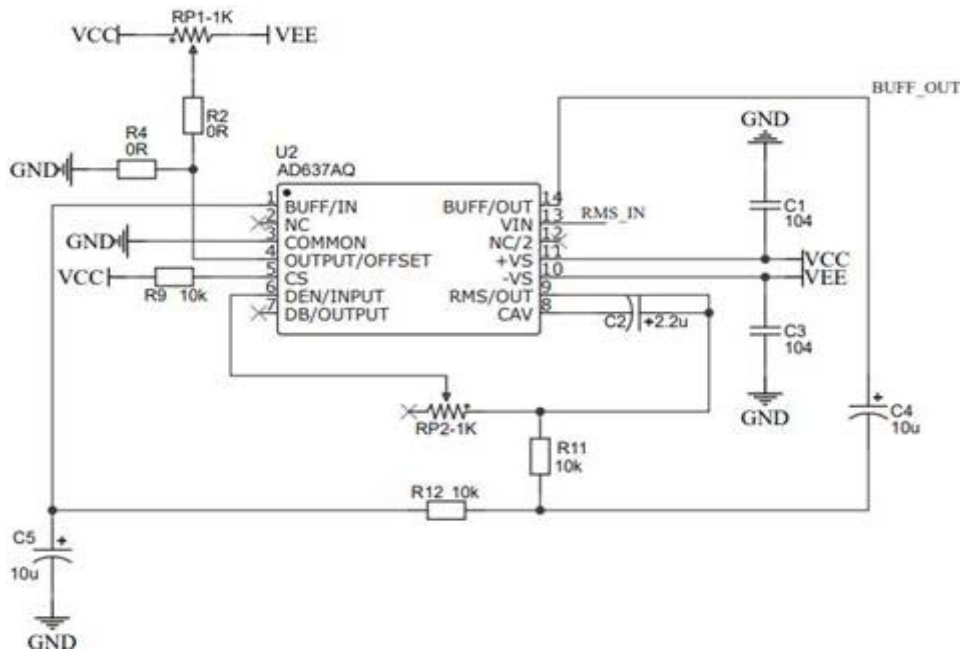


Figure 5. AD637 sampling circuit diagram
图 5. AD637 采样电路图

系统所用单片机只能采集直流电压,因此需要设计采样电路采集交流输出电压的有效值。输出交流电压经过电压互感器隔离降压后[8],再经过 AD637 芯片计算其有效值,最后通过单片机的 A/D 采样口采集。AD637 是一块高精度单片 TRMS/DC 转换器,可计算正弦波的真有效值。在使用前进行偏移微调 and 比例因子微调,可以降低输出误差。同时在 AD637 前级加上放大电路,后级加上缓冲电路,降低前后级电路对采样的影响。采样电路如图 5 所示。

4. 系统软件设计

本设计采用 STM32 单片机作为不间断开关电源 UPS 的核心主控模块。STM32F103ZET6 外设丰富,包含了 112 个的快速 I/O 端口、11 个定时器、12 位的 A/D 转换器和 12 位的 D/A 转换器,相比于其他单片机而言,它有低能耗、主频高、操作简单、调试方便、稳定性高等优点[9]。STM32 单片机能通过自带的定时器 PWM 波,并可以通过定时器的调整转变为 SPWM 波,将 AD 采样的值和设定的值相比较,通过调整前级 PWM 波的占空比对 UPS 电源进行闭环控制。

单相不间断式 UPS 电源的软件设计采用 Keil5 作为开发平台,本系统中的可调输出开关电源采用 PWM 方式进行调节[10],选用双极性 SPWM 正弦脉宽调制,运用面积等效原理调制正弦波,输出的 SPWM 波的基波就是调制需要输出的波形,且不含低次谐波。定时器 8 作为 STM32 单片机中的高级定时器,能够产生双向互补 PWM 波,拥有死区调节功能,然后用另一个定时器通过查表控制输出占空比的方式得到双极性调制的 SPWM 波,利用定时器 4 的中断对 SPWM 波进行频率和调制度的控制,最终得到互补 SPWM 波。定时器 3 产生 PWM 波,控制双向 DC-DC 电路的升压,通过改变定时器 2 的中断频率实现对 ADC 采样频率的控制。

采集输出电压时,利用滑动平均算法对采集的输出电压进行滤波。本设计采用双向 DC-DC 作为升压电路,通过固定 SPWM 波调制比,改变 PWM 波占空比的方式控制双向 DC-DC 电路的升压进而稳定 UPS 电源的输出。当输入电压由交流切换为直流时,通过对输入电压进行 AD 采样,STM32 单片机接收到直流信号指令后,单片机端口输出高电平控制继电器导通,交流电压供电切换为直流电压供电[11]。

PID 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[12]。本文使用的方法是增量型 PID 算法,当采样值大于系统设定的基准值时[13],增大 PWM 波输出的占空比,当采样值小于系统设定的基准值时,减小 PWM 波输出的占空比。增量型 PID 仅与最近三次的采样值有关,没有积分误差,在电压调节上较位置型更快且调节后所得的结果受前期误差影响小,提高了电压调节效率和精准度。系统软件控制流程图如图 6 所示。

5. 测试方案与结果

进行交流电输入测试,输入 29 V~43 V 交流电,负载为 500 Ω 的可变功率电阻,使用功率分析仪测试输出的电压电流以及 THD。由于系统在根据采样反馈实时调整输出电压,输出电压一直在波动,故下表记录的数据中,均取得波动范围内的平均值。

1) 输入交流电 36 V,测试输出交流电流为 1 A 时,输出交流电压为 29.988 V,频率 $f=50$ Hz,输出的正弦交流电失真度 $THD=1.5\%$ 。

2) 输入正弦交流电为 36 V,改变负载电阻,使输出电流从 0.1 A~1 A 变化,测试输出电压,测试结果如表 1 所示。

根据负载调整率计算公式:

$$S_I = \frac{|U_{o(0.1A)} - U_{o(1A)}|}{30} \quad \#(2)$$

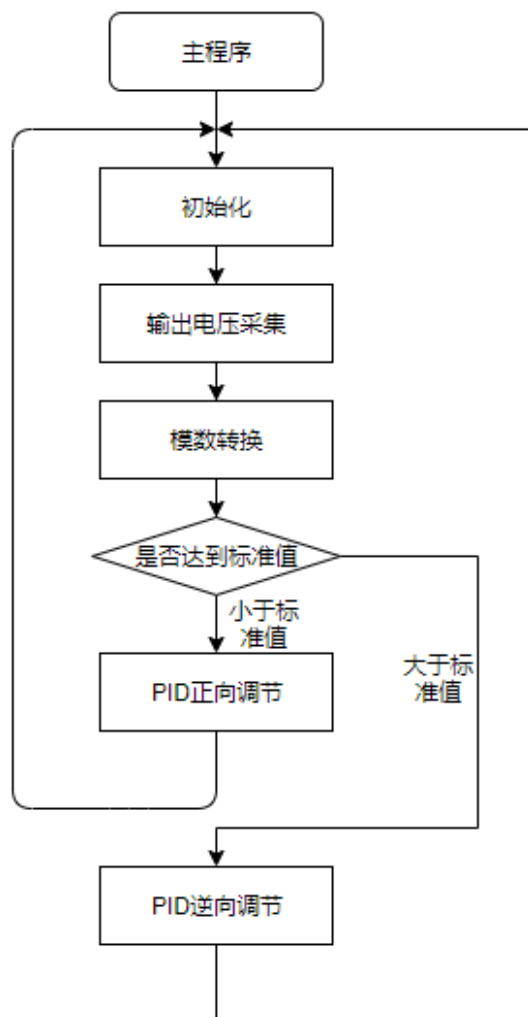


Figure 6. System software control flow chart
图 6. 系统软件控制流程图

Table 1. Load regulation test record
表 1. 负载调整率测试记录

交流输入电压/V	负载电流/A	电源输出电压/V
36	0.1	29.951
36	0.3	29.991
36	0.5	29.960
36	0.7	30.013
36	0.9	29.998
36	1.0	29.988

负载调整率根据测试记录表数据可得 $S_r = 0.123\%$ 。

3) 保持负载 $30\ \Omega$ 不变, 稳定输出电流为 $1\ \text{A}$, 改变交流输入电压, 使电压在 $29\ \text{V}\sim 43\ \text{V}$ 之间变化, 测试逆变输出电压, 测试结果如表 2 所示:

Table 2. Voltage regulation test record**表 2.** 电压调整率测试记录

交流输入电压/V	负载电流/A	电源输出电压/V
29	1	30.032
32	1	29.971
35	1	29.964
38	1	30.031
41	1	29.973
43	1	30.009

根据电压调整率计算公式：

$$S_U = \frac{|U_{o(43V)} - U_{o(29V)}|}{30} \quad \#(3)$$

电压调整率根据测试记录表数据可得： $S_U = 0.077\%$ 。

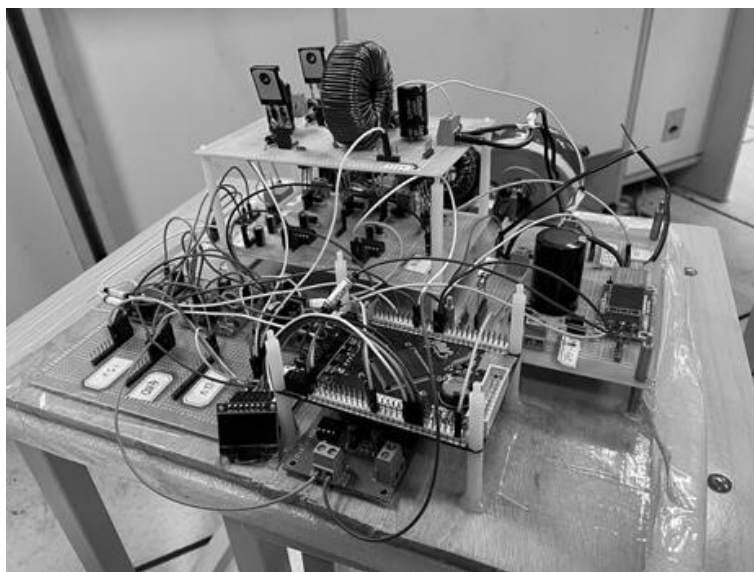
4) 断开交流电，电源自动转换为直流电，同时测试输入功率和输出功率，计算输出效率，测试结果如表 3 所示：

Table 3. DC input test record**表 3.** 直流电输入测试记录

直流输入电压/V	负载电流/A	电源输出电压/V	输入功率/W	输出功率/W
24	1	29.997	33.887	29.997

根据上表记录数据，计算输出的效率 $\eta = 88.52\%$ 。

单相不间断式 UPS 电源实物图如图 7 所示：

**Figure 7.** Physical picture of single-phase uninterruptible UPS power supply**图 7.** 单相不间断式 UPS 电源实物图

6. 结论

本文设计了以 STM32F103ZET6 单片机为控制核心单相不间断式 UPS 电源, 核心电路为全桥逆变电路。输出正弦交流电频率 50 Hz, 电压 30 V。可由直流电和交流电同时供电, 在交流电断电时, 直流电能够及时供电, 切换速度快, 控制方法较先进。电源的负载调整率在 0.5% 左右, 带载能力较强, 电源效率在 85% 以上。不间断电源简称 UPS, 能够为负载安全可靠的提供高品质电能, 被广泛运用于电能质量要求较高的用电场合[14]。本电源可应用于医院管理系统、存储设备、数据服务器等设备, 能够在市电断开时保证设备的正常运行[15]。随着 UPS 电源技术逐渐成熟化[16], 单相不间断式 UPS 电源也在不断地发展, 未来应用将更加广泛、市场价值更高。

参考文献

- [1] 王宇. 单相 UPS 不间断电源系统设计[J]. 广播电视信息, 2014(10): 66-68.
- [2] 张秀, 郑爽, 史国庆. 24V 交流单相在线式不间断电源的设计[J]. 中国新技术新产品, 2008(11): 105-106.
- [3] 李翠花, 潘若云, 周泽华, 李瑶. 基于 ARM32 单相逆变电源的设计与实现[J]. 安阳师范学院学报, 2020(5): 90-93.
- [4] 尹虎臣, 林少伯, 刘建伟, 韩民晓, 李文涛. 基于超级电容器储能的直流 DVR 装置的研发[J]. 大功率变流技术, 2012(1): 17-22.
- [5] 杨俊伟, 翟娟. 基于脉冲变压器隔离的 MOSFET 驱动电路的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(12): 188-193.
- [6] 聂友红. 增程式摩托车增程控制器的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [7] 娄哲理. 一种复合桥式 LLC 谐振变换器的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [8] 高扬, 吕巍, 张姝. 用 PIC 单片机实现 50Hz 锁相信号发生器[J]. 电子产品世界, 2001(5): 60-61+63.
- [9] 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.
- [10] 周斌, 王胜, 涂朝逸, 周雷. 基于 STM32 可控数字开关电源设计[J]. 数字制造科学, 2019, 17(3): 231-235.
- [11] 张红宾, 李晓晨, 赵二刚, 司敏山. 基于 STM32 的便携式数控直流电源设计[J]. 实验室科学, 2019, 22(3): 53-56.
- [12] 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.
- [13] 马鹏飞. 基于平均电流法的单相 Boost 功率因数校正系统研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 赵奋祥. 三相在线式大功率 UPS 的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [15] 刘俊萍. Delta 型数字化 UPS 系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 株洲: 湖南工业大学, 2007.
- [16] 张翔. 三相在线式 UPS 电源的分类和发展趋势探析[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(26): 212-213, 215.