

# 基于STM32的单相在线式不间断电源系统

张西晨\*, 金 海#

浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州  
Email: 2802433362@qq.com, #jinhai@zstu.edu.cn

收稿日期: 2020年11月22日; 录用日期: 2020年12月7日; 发布日期: 2020年12月14日

---

## 摘 要

本设计以STM32单片机为核心, 采用PWM调制和SPWM调制技术分别对双向DC-DC和单相逆变电路进行控制, 并通过PID算法对整体的硬件电路做了闭环调节, 从而实现了可以输出固定频率和稳定电压的UPS电源系统。本系统主要包括变压器模块、双向DCDC模块、单相逆变模块、AD637交流采样模块。该UPS实现了可以输出固定频率和幅值的正弦交流电的功能, 效率可以达到86%。

## 关键词

STM32单片机, PWM, SPWM, AD637交流采样, 闭环控制

---

# STM32-Based Single-Phase Online Uninterruptible Power Supply System

Xichen Zhang\*, Hai Jin#

School of Information, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang  
Email: 2802433362@qq.com, #jinhai@zstu.edu.cn

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Dec. 7<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 14<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This design is based on STM32 single-chip microcomputer, using PWM modulation and SPWM modulation technology to control the two-way DCDC and single-phase inverter circuit respectively, and the overall hardware circuit is closed loop adjusted by PID algorithm, so as to realize the output of fixed frequency and Stable voltage UPS power system. This system mainly includes transformer module, two-way DCDC module, single-phase inverter module, AD637 AC sampling module. The UPS realizes the function of outputting sinusoidal alternating current with a fixed frequency and amplitude.

---

\*第一作者。

#通讯作者。

## Keywords

STM32, PWM, SPWM, AD637 AC Sampling, Closed Loop Control

Copyright © 2020 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

UPS 电源系统是一种电源储能设备, 可以不断地向一些关键设备(铁路和民航的售票系统、互联网数据中心、医院的生命维护设备、银行的清算中心等)提供频率稳定、精度高、失真度小的高质量正弦波[1]。然而传统的逆变电源多为模拟控制, 虽然模拟控制技术已经非常成熟, 但模拟电路存在电路复杂, 灵活性不够, 调试困难, 产品升级慢等缺点。伴随着高速单片机和数字信号处理器的出现, 使逆变电源的数字化控制成为现实, 数字化控制也成为了 UPS 未来发展的一大趋势[2]。而本设计以直流电源代替蓄电池为前提条件, 设计出一款可以稳定输出频率 50 Hz, 幅值有效值为 30 V 的 UPS 电源系统。

## 2. UPS 不间断电源系统的总体设计

本设计在硬件结构上利用双向 DCDC 模块来实现直流升压的功能, 利用单相全桥逆变电路来实现直流逆变交流的功能; 在软件上采用 STM32 单片机实现 PWM 波输出和 SPWM 波的输出, 并利用采样和 PID 算法调节实现了整体电路的闭环控制。由此, 软硬件的结合组成了单相在线式不间断电源系统, 本系统在输入交流电压一定的条件下, 可以输出固定频率和幅值的正弦交流电。利用 PWM 调制技术对双向 DC-DC 电路进行控制, 对 36 V 的电压升到 60 V 左右, 再利用设置固定调制比 0.724 的 SPWM 调制技术对单相逆变电路进行控制, 通过 AD637 有效值采样电路对输出的正弦波进行采样, 通过 PID 算法对 PWM 波的占空比实现闭环控制, 从而得到稳定的 UPS 电源系统。系统的总体框图如图 1 所示。

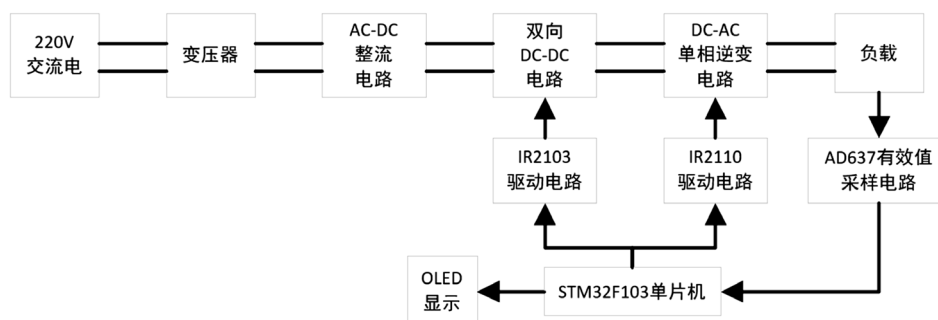


Figure 1. Overall system framework  
图 1. 系统总体框架

## 3. UPS 不间断电源模块设计与选择

### 3.1. 主控单片机的选用

此次电路设计采用 STM32 单片机实现控制功能, 此芯片具有 72 MHz 的速度和高达 1 MB 的闪存。该处理器功耗低、性价比高、应用广泛。具有电源管理电路, 处理器运行电压可从 2 V 到 3.6 V, 具有多

种复位保护措施[3]。从性能上考虑, STM32 单片机处理速度快且自带功能多使用比较方便, 整个系统对精度要求比较高, STM32 的 ADC 采样是 12 位采样, 采样位数足够并且其性价比比同等的处理芯片高。并且相对于其他单片机而言, 低能耗、集成广、主频高、操作简单、适应强、调试方便、稳定性高。它能够通过内置定时器产生占空比不同的 PWM 波, 改变 PWM 波的频率, 实现实时监测和调节[4]。

### 3.2. AC-DC 整流模块的选择

对于整流电路, 选择桥式全桥整流, 如图 2 所示, 通过对交流电的正负半周电流都加以利用, 输出的脉动电流是将交流电的副半周也变成正半周, 再经过电容滤波得到直流电压。桥式全波整流的电流利用率为 100%, 且桥式电路的二极管的负载电流为半波整流的一半, 又因为要求的高效率问题, 所以采用全桥电路。对于滤波电路, 选用 LC $\pi$  型滤波电路。对于交流电, 使更多的交流分量电压更多地降在 L 上; 对于直流, L 的直流电阻很小, 是更多的直流分量降在负载上, 最终使得输入和输出电压满足  $U_o = U_{C1} \approx 1.2U_2$  [5]。

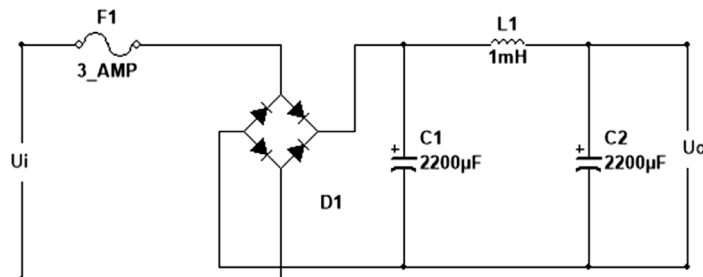


Figure 2. AC-DC rectifier circuit diagram

图 2. AC-DC 整流电路图

### 3.3. 驱动电路设计

对于双向 DC-DC 电路采用 IR 公司的 IR2103 芯片驱动, 而对于后面的单相逆变电路, 选用 IR2110 芯片驱动。对于 IR2103 驱动电路如图 3 所示, C1 为 IR2103 的逻辑电源的滤波电容, C2 为高边 MOS 驱动电源自举电容, 各个引脚的逻辑关系[6]如图 5(左图)所示。对于 IR2110 驱动电路如图 4 所示, IR2110 采用先进的自举电路和电平转换技术, 各电平管脚的输入输出关系如图 5(右图)所示, 同时这大大简化了逻辑电路对功率器件的控制要求, 使得每对 MOSFET (上下管)可以共用一片 IR2110, 并且所有的 IR2110 可共用一路独立电源, 因此我们对于逆变电路的控制选用了两片 IR2110 进行驱动[7]。

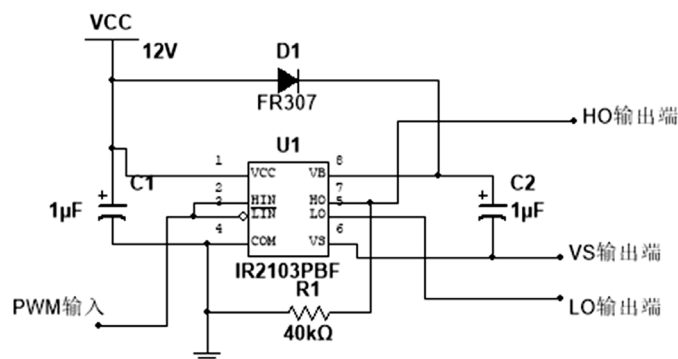


Figure 3. IR2103 drive circuit

图 3. IR2103 驱动电路

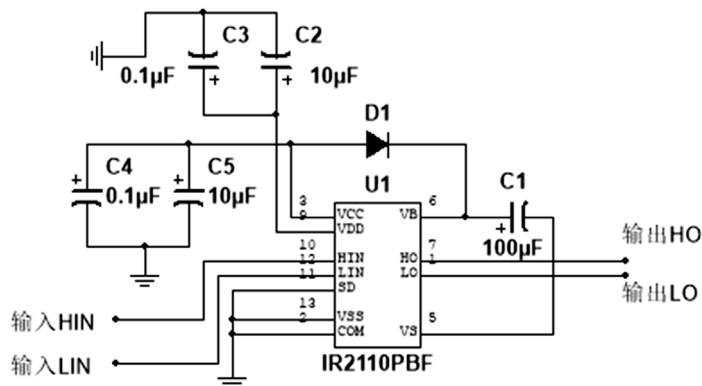


Figure 4. IR2110 drive circuit  
图 4. IR2110 驱动电路

$H_{in}$	$\overline{L_{in}}$	$H_o$	$L_o$
0	0	0	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	1	0

$SD_1$	$H_{in}$	$L_{in}$	$H_o$	$L_o$
1	X	X	0	0
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	1	1

Figure 5. IR2103 (left picture), IR2110 pin level output logic relationship  
图 5. IR2103 (左图)、IR2110 管脚电平输出逻辑关系

### 3.4. 升压模块的设计

升压模块拓扑采用 Buck/Boost 型双向 DC-DC 变换器, 此电压变换器具有电感电流断续和连续模式下变压比保持不变的特性, 有利于动态调节。本设计需要将 29~43 V 电压升压至 60 V 左右, 考虑到开关管的耐压问题, 我们选择耐压值为 200 V 的 IRF640, 对于电路最基本的双向 DC-DC 电路拓扑结构如图 6 所示。

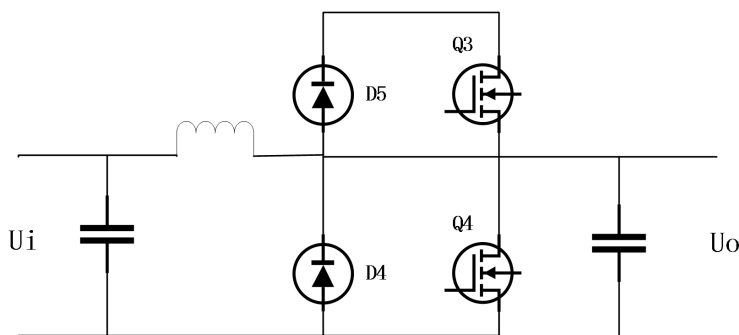


Figure 6. Bidirectional DC-DC main circuit structure  
图 6. 双向 DC-DC 主电路结构

因为仅采用 boost 模式, 当系统运行在 Boost 模式时, 从右侧输入电压 29~43 V, 开关管 T2 和二极管 D2 导通, T1 和 D1 截止。要求变换器输出电压为 60 V, 输出电流 1 A。设定开关频率 80 kHz, 假设电压纹波为 10 mV, 并以此为基础计算功率传输电路的器件参数[8]。

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} = \frac{60 - 43}{60} = 0.283 \quad (1)$$

满载时输入电流平均值为:

$$I_{av} = \frac{P_o}{\eta \cdot U_{i(\min)}} = \frac{60 \times 1}{0.95 \times 29} = 2.178 \text{ A} \quad (2)$$

按设计经验取最大纹波电流:

$$\Delta I = 0.2 I_{av} = 0.2 \times 2.178 = 0.4356 \text{ A} \quad (3)$$

电感 L 的值为:

$$L_{boost} = \frac{(U_{out} - U_{in}) \cdot (1 - D)}{\Delta I \cdot f} = 349 \mu\text{H} \quad (4)$$

在半个开关周期内, 输出电容上电荷变化量为:

$$\Delta Q = \Delta I \cdot \frac{T}{2} = \Delta I \cdot \frac{1}{2f} = 2.723 \mu\text{C} \quad (5)$$

输出电容为:

$$C_{boost} \geq \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{2.723 \mu\text{C}}{0.01 \text{ V}} = 272.3 \mu\text{F} \quad (6)$$

综合设计要求: 为保证合适的纹波电压, 输出电容选择 470  $\mu\text{F}$  的电解电容, 电容的 C 值留足裕量。对于电感的选择, L 值过大会导致带负载能力会下降, L 值过小会导致电流纹波太大而且极容易饱和, 给系统带来严重的影响。综合考虑, 我们选用 500  $\mu\text{H}$  的电感。

### 3.5. 单相逆变模块的设计

对于单相逆变模块的设计, 我们采用单相逆变电路的基本拓扑结构, 如图 7 所示。 $U_{G1}$ 、 $U_{G2}$ 、 $U_{G3}$ 、 $U_{G4}$  分别是四个功率管的驱动电压波形,  $U_{G1}$ 、 $U_{G3}$  和  $U_{G2}$ 、 $U_{G4}$  的波形是互补的。当  $U_{G1}$ 、 $U_{G3}$  为高电平时, 设电流  $i$  为正, G1、G3 两个三极管导通。电流流向为: 电源正极  $\rightarrow$  G1  $\rightarrow$  L  $\rightarrow$  RC  $\rightarrow$  G3  $\rightarrow$  电源负极, 此时电压为  $U_{in}$ 。一段时间后,  $U_{G1}$ 、 $U_{G3}$  变为低电平, G1、G3 关断,  $U_{G2}$ 、 $U_{G4}$  电平变高。若电流  $i_L$  为正, 电流流向为: 电源负极  $\rightarrow$  G2  $\rightarrow$  L  $\rightarrow$  RC  $\rightarrow$  G4  $\rightarrow$  电源正极, 这时电压为  $-U_{in}$ , 具体的电路拓扑图如图 7 所示。

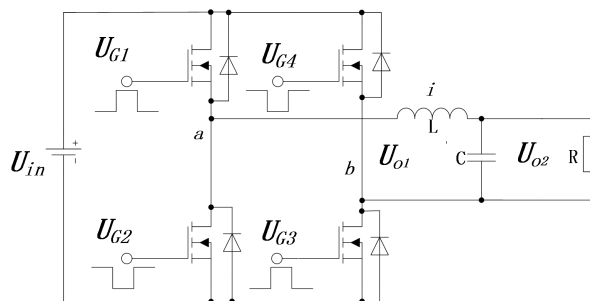


Figure 7. Single-phase inverter circuit  
图 7. 单相逆变电路

同理因为考虑到耐压值的问题, 我们采用耐压值为 200 V 的开关管 IRF640, 滤波电感选择 4 mH, 滤波电容选择交流滤波电容 CBB106 [9]。

### 3.6. 交流采样模块的设计

对于交流采样的功能, 我们采用集成芯片 AD637 进行采样。具体的电路图如图 8 所示。逆变出来的 50 Hz 的正弦交流电通过电压互感器送到 AD637 芯片的输入端, 把转换好的有效值数据送入单片机中进行 PID 控制, 从而实现稳压的功能。

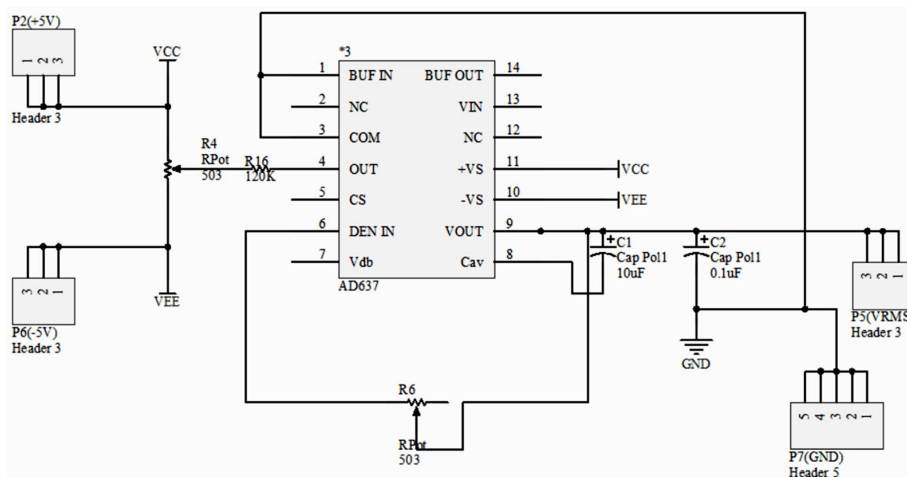


Figure 8. AD637 effective value detection circuit

图 8. AD637 有效值检测电路

通过 AD637 有效值转换电路, 有以下几个优点:

- 1) 无论真有效值的输出波形复杂程度如何都能计算, 还可以输出分贝值。
- 2) 频带宽, 量程可调; 当输入  $U_{in} = 200 \text{ mV}$  时, 上限频率为 600 kHz, 当  $U_{in}$  大于 1 V 时, 上限频率可达 8 MHz;
- 3) 常情况下不需要外部元件, 唯一的外接元件是平均电容  $C_{av}$ , 当接上  $C_{av}$  时, 构成低通滤波器, 只要滤波时间常数  $RC$  远远大于输入信号的周期, 输出信号值就是任意输入信号的真有效值, 若不接平均电容  $C_{av}$ , AD637 就进行绝对值计算。
- 4) AD637 芯片内部有独立的缓冲放大器, 可作为输入缓冲器来用, 还可构成有源滤波器来减小纹波, 提高测量精度。
- 5) 输出端有过压保护电路, 当输入超过电源电压, 基本不会烧坏器件, 所以不需要限幅电路来保护, 并且电源电压宽, 为  $\pm 3 \text{ V} \sim \pm 18 \text{ V}$  [10]。

## 4. UPS 不间断电源系统的软件设计

### 4.1. 软件整体设计

软件编程选择 Keil 软件开发环境和 C 语言编程, 本次软件共用 3 个定时器。正如图 5 流程图所示, 首先通过 STM32 单片机的高级定时器 Timer1 产生 PWM 基波。采用通用定时器 Timer2 的中断, 通过查表法, 控制单片机 IO 口输出 2 组互补的 SPWM 波, 从而控制单相逆变电路输出固定幅值和频率的正弦波。利用单片机的通用定时器 Timer3 使 PB5 口生成 PWM 波, 通过控制 PWM 波的占空比来调节双向 DC-DC 电路的升压比。对于稳压控制, 我们采用一级调节即控制 SPWM 波的调制比不变, 通过 AD637

有效值采样电路读取正弦交流电的有效值, 并利用 PID 算法调节控制双向 DC-DC 升压比, 从而间接地控制输出正弦交流电的电压幅值。具体的软件框图如图 9 所示。

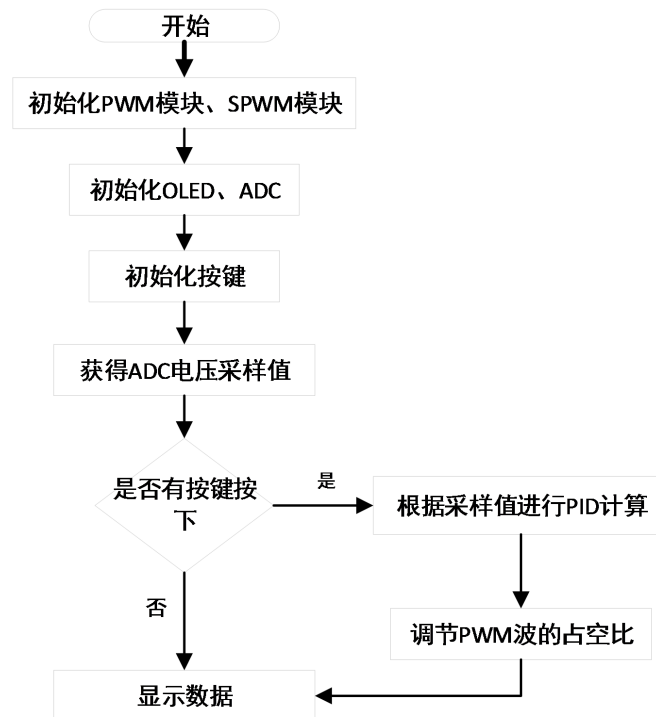


Figure 9. The overall framework of software design  
图 9. 软件设计整体框架

## 4.2. 稳压控制算法实现

稳压控制的重点在于 PID 算法调节, 即通过比例算法 P、积分算法 I 和微分算法 D 来控制, 因为本系统利用 PI 调节就相对来说较为稳定, 所以本设计只采用 PI 调节的方法。通过电压互感器和 AD637 有效值采样电路将采集的电压值送到单片机的采样口, 将采集的电压值和基准值进行比较, 利用 PID 算法进行调节, 从而实现稳压。调节结果的稳定性很大程度上取决于 PID 的参数设置。经典的 PID 算法控制规律为

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

$K_p$  表示比例增益,  $T_i$  表示积分时间常数,  $T_D$  表示微分时间常数,  $u(t)$  表示输出的信号,  $e(t)$  表示采样值和基准值的偏差。而在软件的实现中, 采用队列的思想, 读取 10 个值差值, 去掉最原始的差值, 保留最新的差值, 根据公式计算出差的值即可, 具体的流程图如图 10 所示。

## 4.3. PWM 和 SPWM 调制技术

对于双向 DC-DC 电路的升压功能, 利用单片机高级定时器 Timer3 对 PB5 引脚进行初始化, 并将此 IO 口设置为复用推挽输出功能使其可以输出一定占空比的 PWM 波。当输出高电平时, MOS 管导通, 当输出低电平时, MOS 管关断, 从而可以使硬件电路到达升压的功能。同时对于 STM32 单片机来说, PWM 波的频率和占空比可以分别由 ARR 寄存器和 CCR 寄存器的值决定。对于控制单相逆变主电路的 SPWM



输出我们采用单极性控制, 首先利用高级定时器 Timer1 产生 PWM 基波, 之后再在定时器 Timer2 中通过中断服务函数和查表法改变 PWM 波的占空比, 从而产生具有正弦规律变化的 SPWM 调制波。整个系统的 SPWM 调制技术采用单极性调制, 4 个 IO 分别输出互补的波, 通过 IR2110 驱动电路从而对单相逆变实现控制。SPWM 波生成的流程图如图 11 所示。

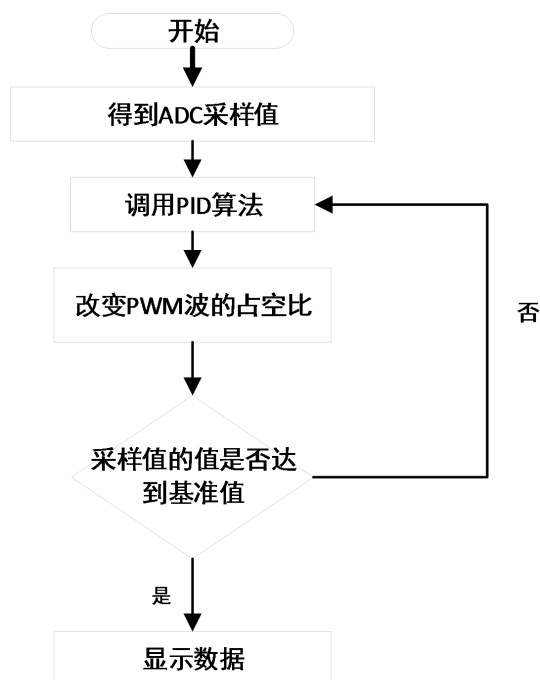


Figure 10. Flow chart of voltage stabilization algorithm  
图 10. 稳压算法流程图

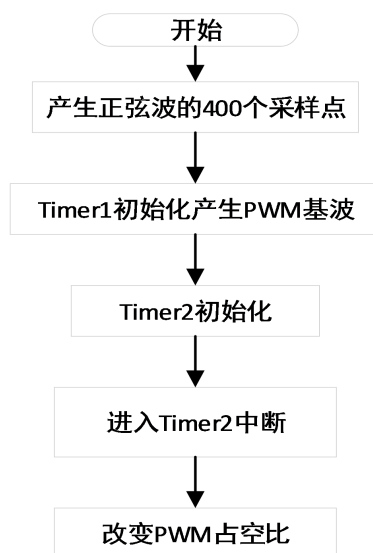


Figure 11. SPWM wave generation  
图 11. SPWM 波生成

程序片段如下:



```

if(i<201)
{
    TIM_SetCompare1(TIM1,(u16)(Period_percent*spwm1[i++])); //修改 TIM1 通道 1 的 PWM 占空
比, 后者为捕获/比较寄存器 1 的值
}
else if(i>200&& i<400) //一周采样 400 个点
{
    TIM_SetCompare1(TIM1,0);
    i++;
}
else if(i== 400)
    i = 0;
if(j<400) //一周采样 400 个点
    TIM_SetCompare3(TIM1,(u16)(Period_percent*spwm2[j++]));
else if(j== 400)
    j = 0;
}

```

#### 4.4. ADC 采样

本设计共有一路采样, 即正弦交流电的有效值检测采样, 通过采样处理将整个电路做成 PID 闭环控制。对于采样函数做一定的滤波处理, 即滑动平均滤波法, 设计一个队列, 将采样到最新数据放到队尾, 并扔掉原来队首的一次数据, 把队列的 N 个数据进行算数平均计算从而得到最新的滤波结果[11]。

```

void Get_Adc_Average2_init(u8 ch)
{
    for (i=0;i<10;i++)
    {
        value[i]=Get_Adc2(ch);
        temp_val1=temp_val1+value[i];
    }
}
u16 Get_Adc_Average2(u8 ch)
{
    if(i==10) i=0;
    temp_val1=temp_val1-value[i];
    value[i]=Get_Adc2(ch);
    temp_val1=temp_val1+value[i];
    i++;
    return temp_val1/10;
    delay_ms(5);
}

```

## 5. 测试方案与结果

### 测试结果

1) 测试  $U_i = 36\text{ V}$ ,  $I_o = 1\text{ A}$  时输出电压  $U_o$  和频率  $f$ , 结果见表 1。

**Table 1.** Record of output voltage and frequency under AC power supply

**表 1.** 交流供电下输出的电压和频率记录

交流供电	输出电压(V)	输出频率(Hz)
$U_i = 36\text{ V}; I_o = 1\text{ A}$	30.017	49.998
	29.997	49.878
	30.045	50.012
	29.955	49.889
	30.091	50.053

2) 通过调整负载, 输出电流  $I_o$  为 0.1 A、1 A 时对应的输出电压  $U_o$ , 结果见表 2。

**Table 2.** Adjust the load output current and voltage record

**表 2.** 调整负载输出电流电压记录

输入电流(A)	输出电压(V)
0.1	29.93
0.3	29.91
0.5	29.90
1.0	29.85

负载调整率为 0.27%

3) 测试负载调整率,  $U_i$  为 43 V、29 V 时对应的输出电压  $U_o$ , 结果见表 3。

**Table 3.** Adjust voltage output current and voltage record

**表 3.** 调整电压输出电流电压记录

输入电压(V)	输出电流(A)	输出电压(V)
29.00	0.99	29.92
36.00	1.00	29.95
43.00	1.00	29.97

电压调整率: 0.2%

4) 断开交流电, 即时切换至直流(储能器件侧)供电,  $U_d = 24\text{ V}$ , 输出交流电流  $I_o = 1\text{ A}$  时, 输出交流电压  $U_o = 30\text{ V} \pm 0.2\text{ V}$ , 频率为  $f = 50\text{ Hz} \pm 0.2\text{ Hz}$ , 结果见表 4。

**Table 4.** DC power supply inverter voltage record

**表 4.** 直流供电逆变电压记录

输入直流电压(V)	输出电流(A)	输出电压(V)
24.00	1.00	29.95
24.00	0.99	29.90

效率: 86.31%

5) 硬件实物图如图 12 所示。

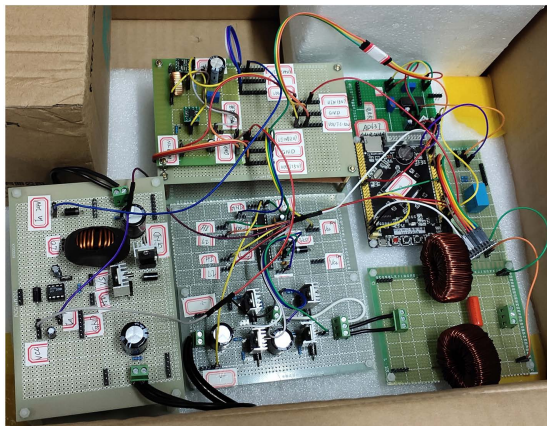


Figure 12. Physical picture of the overall circuit  
图 12. 整体电路实物图

## 6. 结论

本文设计的基于 STM32 的单相在线式不间断电源系统, 详细介绍了各硬件电路选用和设计以及软件的处理思路。通过实验验证, 该系统可用于交流和直流供电的情况, 并具有良好的扩展性和可升级性, 效率可达到 86% 左右, 可以充当银行的清算中心、互联网数据中心等应用情景下的 UPS 电源。

## 参考文献

- [1] 唐剑青. 数字化不间断电源的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 李伟. 数字控制逆变电源的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [3] 张凌雪. 基于 STM32F103 的智能小车设计[J]. 农家参谋, 2020(23): 106.
- [4] 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.
- [5] 刘波粒, 刘彩霞. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [6] 申浩锋, 高宁波. 基于 IR2103 的步进电机全桥驱动电路设计[J]. 微电机, 2016, 49(10): 67-71.
- [7] 贺根华, 祁承超, 柳鑫. 基于 DSP28335 + IR2110 芯片的移相全桥驱动电路设计[J]. 惠州学院学报, 2018, 38(3): 67-70.
- [8] 于玉军, 王亚君, 陈垚. 小型高效数字式双向 DC/DC 变换器设计[J]. 电子器件, 2020, 43(5): 1029-1034.
- [9] 程星, 黄要然, 艾皓, 谢作生. 基于 tms320f28027 的逆变电源制作[J]. 电子制作, 2019(1): 12-14+5.
- [10] 余海宁, 邵红艳, 邱望标. 非正弦波中频强磁场测量方法及装置[J]. 机械与电子, 2017, 35(8): 45-49+53.
- [11] 崔建伟. 基于嵌入式系统的数字滤波器、倾角传感器设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2008.