

归 档 号：

武汉工商学院毕业论文(设计)

学院：人工智能学院

专业：电子信息工程

年级：2016 级

学生：

学号：

指导教师：

职称：

题目：基于 STM32 的单相变频逆变器的设计

2020 年 5 月 20 日

武汉工商学院

本科毕业论文（设计）原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

2020 年 5 月 20 日

目 录

摘 要.....	I
关键词.....	I
Abstract.....	II
Key words	II
1 绪论.....	1
1.1 逆变器的研究背景与意义.....	1
1.2 逆变技术的发展及趋势.....	1
1.3 本文的主要内容.....	2
2 设计内容和方案的选择.....	3
2.1 系统的设计要求和指标.....	3
2.2 单相变频逆变器拓扑结构及选型.....	3
2.3 逆变电路原理分析.....	3
2.4 单相变频逆变总体结构设计.....	5
2.5 逆变器驱动方案选择.....	5
2.6 电路保护方案选择.....	6
2.7 辅助电源方案选择.....	6
3 硬件设计.....	8
3.1 主控系统电路设计.....	8
3.2 主功率电路设计.....	8
3.3 辅助电源电路.....	10
3.4 驱动电路.....	10
3.5 滤波器的设计.....	11
3.6 电压、电流检测电路.....	12
4 软件设计.....	14
4.1 SPWM 的控制原理.....	14
4.2 SPWM 信号的调制方式.....	15
4.3 SPWM 波的软件生成方法.....	17
4.4 闭环控制策略.....	17

5 实验结果测试与分析.....	19
5.1 双极性调制仿真与结果分析.....	19
5.2 单相逆变器仿真与结果分析.....	20
5.3 单相逆变器实物测试结果分析.....	21
5.4 数据误差分析.....	25
6 总结.....	26
参考文献.....	27
附录.....	28

基于 STM32 的单相变频逆变器的设计

摘 要

本设计是一款基于 STM32F103C8T6 单片机的单相变频逆变器，其输入为 36V~40V 的直流电，输出默认状态为 25V/50HZ 的纯正弦交流电，可手动调节输出交流电的频率。本设计采用模块化的方式进行设计，主功率部分采用全桥拓扑结构，控制部分采用单片机输出 SPWM 波控制全桥实现逆变，通过对电压、电流采样与 PID 算法实现系统的闭环控制，人机交互控制系统实现变频功能。整个系统具有输出稳定、响应速度快、人机交互性好、控制方便、适用范围广等特点。

关键词：变频逆变器；STM32 单片机；全桥拓扑；SPWM；PID

Design of phase Frequency conversion single inverter based on STM32

Abstract

This design is a single-phase frequency conversion inverter based on STM32F103C8T6 single chip microcomputer, the following unified to as the inverter, its input is 36V~40V dc, output default state is 25V/50HZ pure sine alternating current, you can manually adjust the frequency of output alternating current. This design adopts the modular way to design, the main power part adopts the full bridge topology structure, the control part adopts the single-chip microcomputer output SPWM wave control the whole bridge to realize the inverter, through the voltage, current sampling and PID algorithm to achieve the closed-loop control system, man-machine interactive control system to achieve the frequency conversion function. This design has the characteristics of stable output, fast response, good man-machine interaction, convenient control and wide application.

Key words: Inverter; STM32 single chip microcomputer; Full bridge topology; SPWM; PID

1 绪论

1.1 逆变器的研究背景与意义

逆变器是电力电子中常用的一种能量转换装置，指的是整流器的逆向变换器，其主要的作用为通过半导体功率开关器件的导通和关断作用，将直流电能变换为交流电能^[1]。随着新能源时代的来临，逆变器的应用也越来越广泛与重要。

作为世界三大能源的石油、天然气和煤等化石燃料的储量日益减少，但工业生产和人们生活消费等对能源的需求量却与日俱增。水电、核电、氢能源等清洁能源显得尤为重要，以氢能源与可再生能源为主的高效低污染的燃料电池发电方式将成为未来能源的主力军。能源主体的变迁带来的是发电方式的变革，此时逆变技术在新能源时代的作用将格外重要。

现阶段逆变器主要有两大主力应用阵营。一是在风电、光电等清洁能源方面的应用，如光伏逆变器。众所周知，目前对这些可再生能源的利用率还不够高，而此时一款性能可靠良好而高效的逆变装置对充分利用这些能源就显得格外重要。二是应用于汽车领域的车载逆变器。随着汽车的普及，车载设备的增加，汽车上原有的 12V 的蓄电池的电压已经无法满足更多的设备需求了，需要以 220V/50HZ 的交流电来供电。这时候一款应用于汽车上的小型、高效、安全的车载逆变器就具有广阔的市场价值。综上所述研究设计一款高效性能良好的逆变电源设备具有非常重要的意义与价值。

1.2 逆变技术的发展及趋势

目前普遍认为逆变技术的发展可划分为三个阶段：

第一阶段：20 世纪 80 年代之前的传统发展阶段。此阶段主要是逆变技术的探索与正弦逆变器的诞生，本阶段的逆变器的主要特点是大体积、低速度、低频率、低效率。

第二阶段：80 年代至 21 世纪初的高频高速阶段。此阶段主要是逆变技术的补充与完善，开关器件发展为高速器件，开关频率大幅提高，输出波形改善开始应用脉宽调制技术，逆变器的重量和体积大幅减小，效率显著提高。

第三阶段：21 世纪以后的高效低污染阶段。此阶段是逆变技术与其他技术的联合运用，此阶段逆变器的特点是不再追求某一方面的极致发展，而是开始寻求多技术联合运用，提升逆变器效率的同时，还要追求环保。

随着微电子技术、电力电子技术的发展，逆变器也得到了快速的发展，目前

逆变器的的发展方向主要有：

（1）高频化。即提升功率开关器件的工作频率，有助于减小逆变器体积的、提高系统的动态响应能力与抗噪声干扰能力。

（2）高性能化。即提高系统的输出电压稳定性，使得输出电压的波形质量高、频率稳定、带非线性负载能力好、可靠性高。

（3）高输入功率因数化。即提高输入侧的功率因数，有助于减少逆变器对电网的谐波污染

（4）智能数字化。逆变器的智能数字化不仅仅是在逆变器中应用单片机等数字器件，还有利用数字器件的计算能力和算法控制整个系统，提高系统的响应速度与稳定性，使之更方便与应用与生产生活中的各个行业。

1.3 本文的主要内容

第一章：绪论部分，主要介绍了逆变器的研究背景与意义，以及逆变技术的发展趋势。

第二章：介绍了本设计的具体设计要求，对电路拓扑结构进行设计分析。确定个电路模块所采用方案。。

第三章：本设计的硬件电路设计分析，详细阐述各电路模块的工作原理，对电路元器件选型，各种外围电路等进行设计分析。

第四章：系统的软件设计。详细介绍了 SPWM 波的生成原理，STM32 的控制程序的设计流程，以及本设计的控制策略。

第五章：实验波形分析。对本设计的仿真与硬件的各设计指标与性能进行测试。

第六章：总结，对本文设计的单相变频逆变器的设计总结与展望。

2 设计内容和方案的选择

2.1 系统的设计要求和指标

在设计中要求设计一款单相变频逆变器，要求输入为直流，输出为交流，且要求输出的交流的频率可调节，同时可同步显示出系统的输出电压、电流和输出交流的频率，系统的误差要尽量小。具体设计指标要求如下：

(1) 输入为 36V~42V 直流，输出为稳定的 $25 \pm 0.5\text{V}$ 正弦交流电。

(2) 输出交流电压初始频率为 50HZ，可用按键进行调节，调节范围为 20HZ~100 HZ，步进 1HZ。

(3) 可同步显示输出电压、电流以及频率值。

(4) 电流最高可达 2A，具有过流过压保护功能，过流过压后系统自动关断。

(5) 主控采用 STM32F103C8T6 单片机, 显示采用 oled 液晶。

2.2 单相变频逆变器拓扑结构及选型

常规的逆变器设计方案一般有两种，一种是采用传统的逆变电路结构设计的工频逆变电源。此种设计方案由两部分组成，一部分是逆变电路，另一部分就是工频变压器。其基本原理是首先通过逆变电路将直流电转换为交流电，此交流电压为小电压，而后，此电压再经过工频变压器升压，即可得到所需要的较大电压的交流电^[2]。此种方案的优点是电路结构简单，但是其缺点也很明显，即工频变压器的体积较大，噪声较高。并不适用于小型电源。

第二种方案则是现在工业应用中广泛使用的两级变化电路结构，此方案的电路结构刚好和上一种方案相反，即先将小电压直流升压至大电压直流，升压方式有很多种，如正激、反激、全桥和推挽电路等，再将此直流通过逆变电路转换为所需要的交流电。这种结构以高频变压器代替工频变压器，既降低了逆变器的体积和成本，也提高了电能的转换效率。

在本设计中由于所输出的交流电压较小，为了安全其输入电压采用电源箱供电，所以在本设计中大大简化了电路结构，故只需采用第一种方案的前级逆变部分即可。既优化电路结构，也降低了设计成本。

2.3 逆变电路原理分析

在本设计中所采用的全桥拓扑的电路结构如下图 2-1 所示。

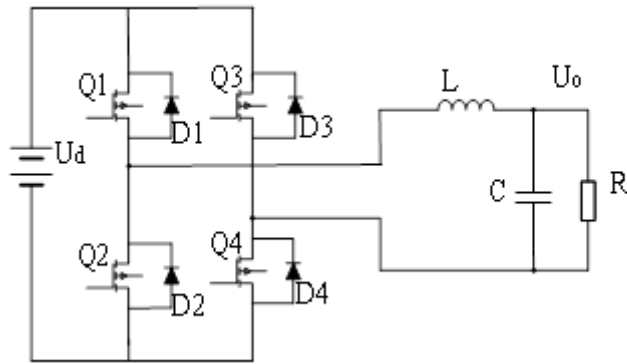


图 2-1 全桥拓扑电路结构图

如图 2-1 所示全桥电路的电路结构主要由四个功率开关管、四个续流二极管和后级滤波电路所构成。通过单片机给四个开关管驱动信号，使四个开关管组成的全桥的左桥臂和右桥臂依次交替导通即可完成直流转换为交流的过程，再经过后级滤波器将转换过程中所产生的高次谐波滤除，即可得到所需的高质量交流电了。

图 2-1 中， Q_1 和 Q_2 组成左桥臂， Q_3 和 Q_4 组成右桥臂。单片机给各开关管的驱动信号为：在 Q_1 、 Q_2 的基极给一对反相的驱动脉冲信号， Q_3 、 Q_4 也是一对反相的驱动信号，同时右桥臂的驱动信号相位要落后于左桥臂，落后的相角为 θ 。全桥逆变电路工作波形如图 2-2 所示。

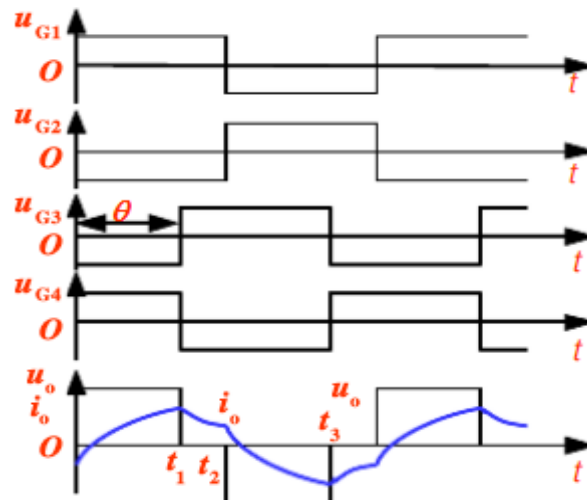


图 2-2 全桥逆变电路工作波形图

其具体的工作过程如下：

在 t_1 时刻前 Q_1 、 Q_4 导通，输出电压 u_o 为 $+u_d$ ；

(1) t_1 时刻 Q_3 和 Q_4 的栅极信号反相， Q_4 截止，因为 i_o 不能突变， Q_3 不能立刻导通， D_3 导通续流，此时输出电压为 0；

(2) t_2 时刻 Q_1 和 Q_2 的栅极信号反相， Q_1 截止， Q_2 不能立刻导通， D_2 导

通续流，和 D3 构成电流通路，此时输出电压为 $-u_d$ ；

(3) 到负载电流过零开始反相，D2、D3 截止，Q2、Q3 开始导通，此时输出电压仍然为 $-u_d$ ；

(4) t_3 时刻 Q3 和 Q4 的栅极信号再次反向，Q4 截止，Q3 截止，Q4 不能立刻导通，D4 导通续流，此时输出电压再次为 0。

输出电压 u_0 的正负脉冲宽度都各为 θ ，改变 θ 的大小，就可以随之改变输出电压的大小。

2.4 单相变频逆变总体结构设计

在本设计中由于简化了设计参数，故只需对逆变电路的主功率电路进行选取设计即可。由于要求输出电压波形为正弦波，在常见的电路拓扑结构中可以完美的输出正弦波的交流拓扑结构只有桥式结构，而桥式结构又可分为半桥拓扑结构和全桥拓扑结构^[3]。半桥结构输出的电压只有母线电压的一半，虽然其电路简单，器件少，但输出功率较低，电压损耗过大，不符合本设计要求。而相对于半桥拓扑结构来说，全桥拓扑结构的性能则要优异很多，输出电压高，转换效率高，输出功率大等。所以综上所述本设计的逆变电路拓扑结构为全桥逆变电路拓扑。系统框图如下图 2-3 所示。

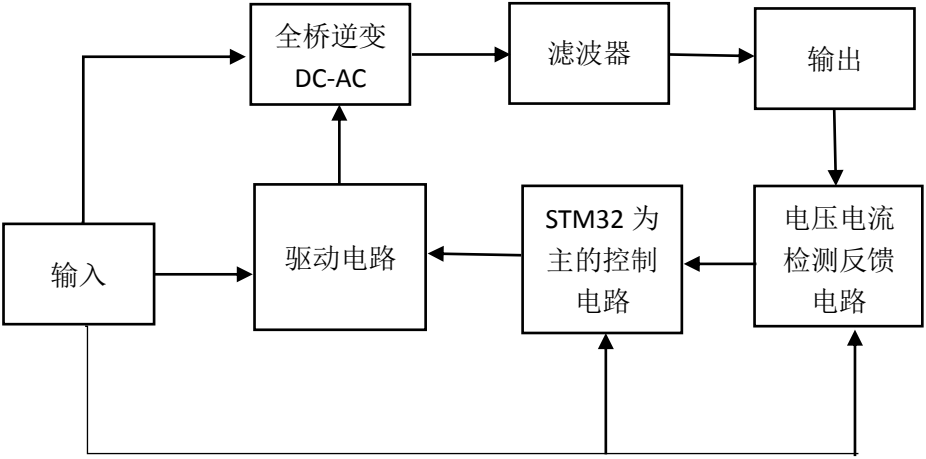


图 2-3 系统设计框图

2.5 逆变器驱动方案选择

驱动电路在整个系统中的作用是承上启下，即连接系统控制电路与功率电路的作用。由于在控制芯片 STMS32F103C8T6 的 I/O 口输出的 SPWM 脉冲信号电压幅值只有 3.3V，不能直接用于驱动逆变电路中的功率开关管，所以必须设计出专门的开关管的驱动电路。在设计 MOSFET 驱动电路时，需满足以下要求：

(1) MOSFET 的驱动功率较小、导通时的压降也很低，常规的栅极驱动电压

在 6V 左右即可导通，而为了降低其导通的损耗，其应当工作在饱和区，此时其导通电压在+12V~15V，同时为了保证 MOSFET 不被源极漏电流击穿，其栅极驱动电压也不能过高^[4]。

(2) 为了使其栅极驱动电压上升沿得到改善，需在栅极接一个寄生电阻，减小电流对 MOSFET 的冲击。

(3) 系统电源隔离，即保证控制电路和驱动电路之间有很强的电气隔离，保证系统的稳定工作。

(4) 电路结构稳定可靠，性价比高。

常规的驱动电路有两种：一种是采用光耦隔离驱动，即以光耦器件作为数字芯片与开关管之间的缓冲级，光耦隔离的方案具有隔离效果好外围电路简单，成本低廉的优点，但是常规的光耦器件一个只能隔离一路驱动，而本设计中需要用到 4 路驱动，用光耦隔离则显得有些麻烦了，且光耦器件的参数固定，对于电路调试来说很不友好。而一种方案则是采用专用的半桥驱动器来设计驱动电路，常见的半桥驱动器有 IR2104，IR2110 等，采用此种方案虽然外围电路较为复杂，但是具有驱动范围广，调试简单，等优点，还大大节省了程序设计的繁琐步骤。故而本设计采用的是第二种方案。

2.6 电路保护方案选择

常用的电路保护方案有两种：一是硬件电路保护，即使用硬件搭建保护电路，如采用保险丝做过流保护，采用继电器、电压比较器搭建电压保护电路，此方案电路复杂器件繁多，增加了硬件调试的工作量。且电路参数固定，不具有通用性。二是采用软件保护，即实时监测电路中的电压电流值，若超过阈值，则单片机自动停止输出，电路自动关断，停止输出。采用此方案，不需要过多的硬件电路，仅仅需要简单的电压、电流检测电路即可，通过软件设置电路保护阈值，且其与采集电路输出电压、电流值实现电路闭环的模块可通用数据。具有调试方便、电路简单、成本低廉的优点。综上所述本设计采用软件电路保护的方案。

2.7 辅助电源方案选择

辅助电源的作用是给整套系统供电，本系统中需要的电源有单片机最小系统的 +3.3V，驱动芯片使用的 +12V 和电压电流采样电路中放大器使用的 $\pm 5V$ ，而本系统的电能取自输入的电压至少为 36V。

则有两种常规的方案如下：

方案一：使用输出电压稳定，纹波小的线性电源，又称低压差线性稳压器（LDO）。但是其缺点也很明显即在输出电流较大或者输入输出压差大时，势必产生很大的损耗，导致稳压器发热严重。

方案二：使用高效率的集成开关电源稳压器。其内部开关管工作在饱和区和截止区，具有很小的导通损耗和开关损耗；但其纹波较大，而通过提高开关频率和输出 LC 滤波器截止频率的降低，即可将纹波降低，但仍然比线性稳压器高；同时，集成开关电源稳压器的外围电路比线性稳压器多复杂。

鉴于本设计中所需要电压复杂，压差大的特点，采用方案一和方案二联合运用的方法实现电路的辅助供电。

3 硬件设计

系统的整体电路图可见附录硬件原理图，单相变频逆变器的主电路主要由主控制系统电路、主功率电路、辅助电源、驱动电路、滤波电路、检测电路组成。下面将具体介绍硬件电路部分的相关元器件参数分析和具体选型。

3.1 主控系统电路设计

STM32 单片机是 ST 公司推出的一款基于 Cortex-M 内核的高性能 CPU，广泛的应用于工业、汽车、医疗、科研教学等领域^[5]。本设计中所采用的是型号为 STM32F103C8T6 的 STM32 系列 32 位单片机，其程序存储器容量为 64KB，工作电压典型值为 3.3V，最高主频为 72MHz，具备内置 ADC、PWM 等模块，且结构简单、成本低廉。非常适合作为各种小型设备的主控。其最小系统包括晶振、复位、供电、BOOT 模式选择等。最小系统电路如图 3-1 所示。

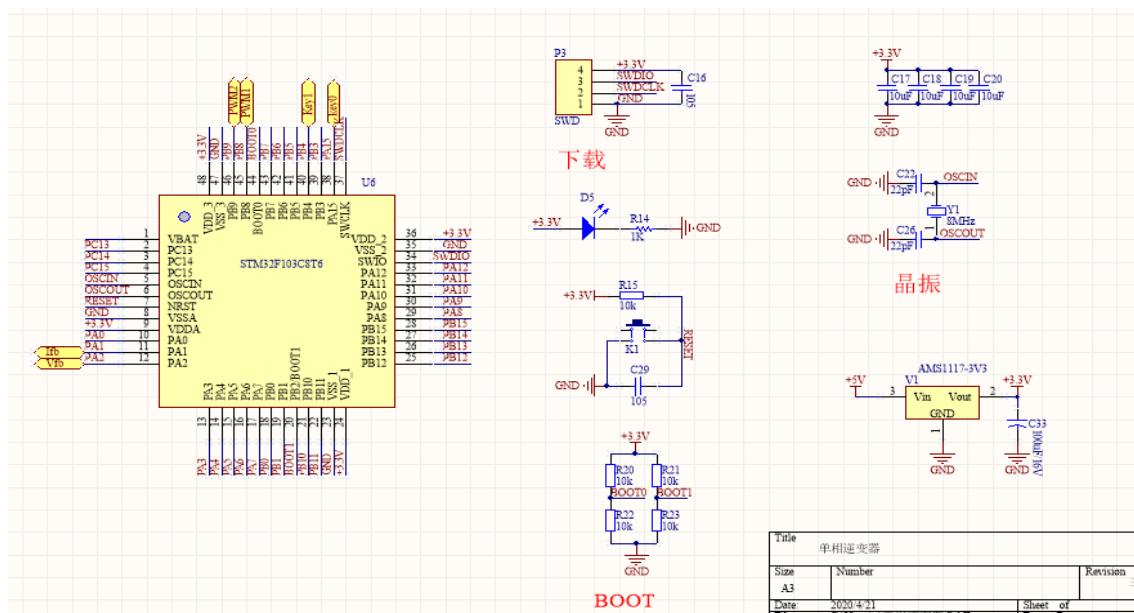


图 3-1 STM32F103C8T6 最小系统电路图

3.2 主功率电路设计

本设计系统主功率部分为逆变全桥，系统主功率电路如图 3-2 所示。本设计要求输出交流电压有效值为 25V，那么对于输入电压 V_{in} 则有：

$$V_{in} \geq V_{AC \text{ out}} * \sqrt{2} = 25V * 1.414 = 35.35V \quad (3-1)$$

即输入电压必须大于 35.35V。在本设计中所采用的调制方式为 SPWM 调制，SPWM 调制存在一个调制比，理想的调制比为 1，常规的调制比一般设计为 0.8~0.9 比较稳妥，因为电路中的电感、二极管、开关管等均存在压降，所以调制比不能设置为 1^[6]。那么此时的输入直流电压 V_{in} 则有：

$$V_{in}=25V*1.414/0.9= 39.3V \quad (3-2)$$

所以在本设计中直流输入电压应当在 40V 左右。

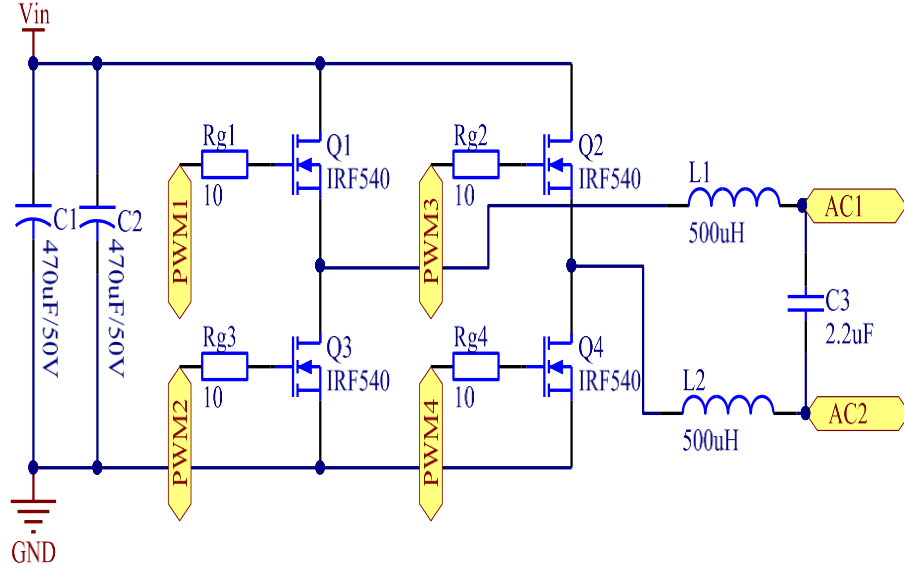


图 3-2 系统主功率电路图

在本设计中，全桥中分功率开关管选取的是 MOSFET，MOSFET 具有开关速度快，输入阻抗高等优点。结合系统的各技术指标，从开关管的耐压、耐流、工作频率等方面进行分析选型。在本设计中系统的最大输出功率为 50W，输出电压为 50V/50Hz。且逆变电路中选用的开关管的开关频率为 50Hz，通过计算可得：

逆变电路开关管工作频率为：

$$f=20KHz \quad (3-3)$$

逆变电路中功率开关管电压应力为：

$$V_{ds} = V_{dc} = 40V \quad (3-4)$$

逆变电路中电流有效值为：

$$I_{irm} = \frac{P}{V_{ac}} = \frac{50}{25} = 2A \quad (3-5)$$

逆变电路中电流峰值为：

$$I_{PK} = \sqrt{2}I_{irm} \approx 2.8A \quad (3-6)$$

根据上述的分析和计算，综合考虑电源在带载情况下开机启动时，开关管要承受的瞬时电流可达到峰值电流的 2 倍以上，所以本设计中选取的功率开关管为型号为 IRF540 的 MOS 管，其相关参数如下：

$$V_{DS} = 100V; R_{DS} = 0.052\Omega; I_D = 33A; T_{off} = 26ns. \quad (3-7)$$

3.3 辅助电源电路

本系统前级 35V 到 12V 压差较大，线性稳压器势必发热严重，因此使用集成开关电源稳压器 LM2596，利用其效率高的优点来降低电能损耗。而后级压差不大，则使用线性稳压器 LM7805 和 AMS1117 即可，其输出电压波纹很小，电压稳定适合单片机等数字芯片。对于负电压-5V，直接使用金升阳的隔离电源模块 B0505S 完成。辅助电源电路图如图 3-3 所示。

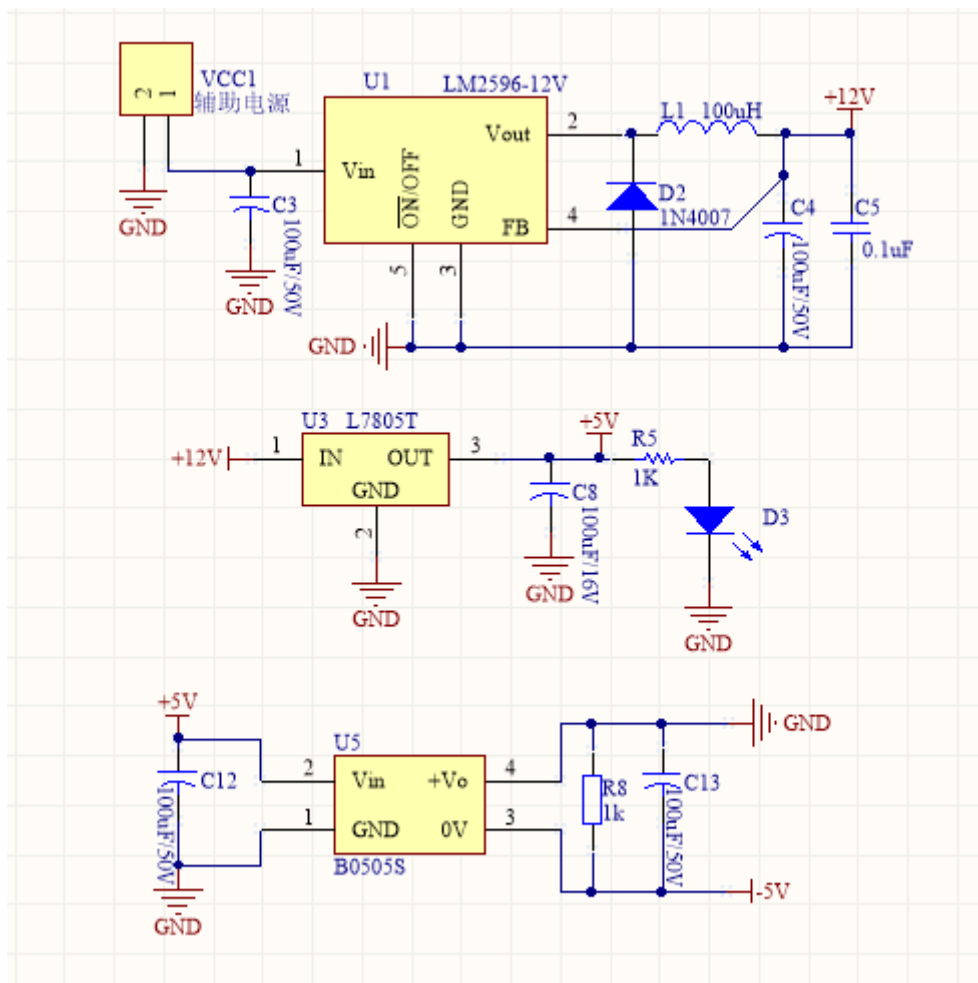


图 3-3 辅助电源电路

3.4 驱动电路

本设计所采用的半桥驱动芯片 IR2104 设计驱动电路，此芯片为 8 引脚，其抗干扰能力强，自身损耗少，电路结构相对简单、性价比高。其内部采用电容自举法。只需要一个芯片即可达到输入一路 SPWM 即可实现双通道驱动。本设计的其中一半驱动电路如图 3-5 所示。单片机输出的 SPWM 脉冲信号接到 IR2104 的 2 管脚，IR2104 即可输出两路自举升压的驱动信号。

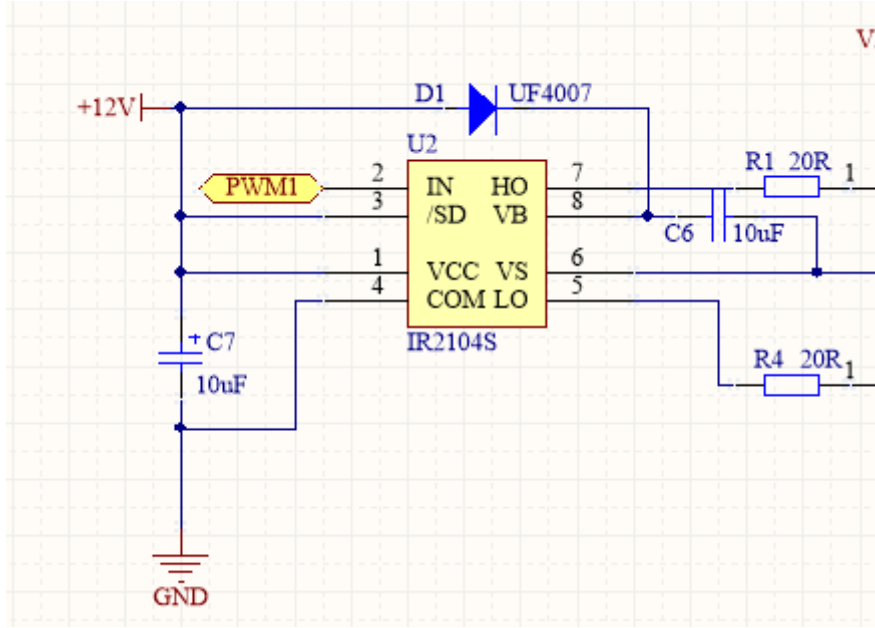


图 3-4 驱动电路电路图

在本设计中，功率开关管选取的是 MOSFET，MOSFET 具有开关速度快，输入阻抗高等优点。结合系统的各技术指标，从开关管的耐压、耐流、工作频率等方面进行分析选型。在本设计中系统的最大输出功率为 50W，输出电压为 50V/50Hz。且逆变电路选取的开关管的开关频率为 50Hz，通过计算可得：

逆变电路开关管工作频率为：

$$f = 20\text{KHz} \quad (3-8)$$

逆变电路中功率开关管电压应力为：

$$V_{ds} = V_{dc} = 40\text{V} \quad (3-9)$$

逆变电路中电流有效值为：

$$I_{irm} = \frac{P}{V_{ac}} = \frac{50}{25} = 2\text{A} \quad (3-10)$$

逆变电路中电流峰值为：

$$I_{PK} = \sqrt{2}I_{irm} \approx 2.8\text{A} \quad (3-11)$$

根据上述的分析和计算，综合考虑电源在带载情况下开机启动时，开关管要承受的瞬时电流可达到峰值电流的 2 倍以上，所以本设计中选取的功率开关管为型号为 IRF540 的 MOS 管，其相关参数如下：

$$V_{DS} = 100\text{V}; R_{DS} = 0.052\Omega; I_D = 33\text{A}; T_{off} = 26\text{ns}. \quad (3-12)$$

3.5 滤波器的设计

本设计中开关管的工作频率为 20KHz，在工程上取十分之一开关频率作为截

止频率设计滤波器所以既有：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 0.1f_s \quad (3-13)$$

本设计中取双电感，各为 600uH，电容为 2.2uF，足以满足要求。滤波电路如图 3-5 所示。

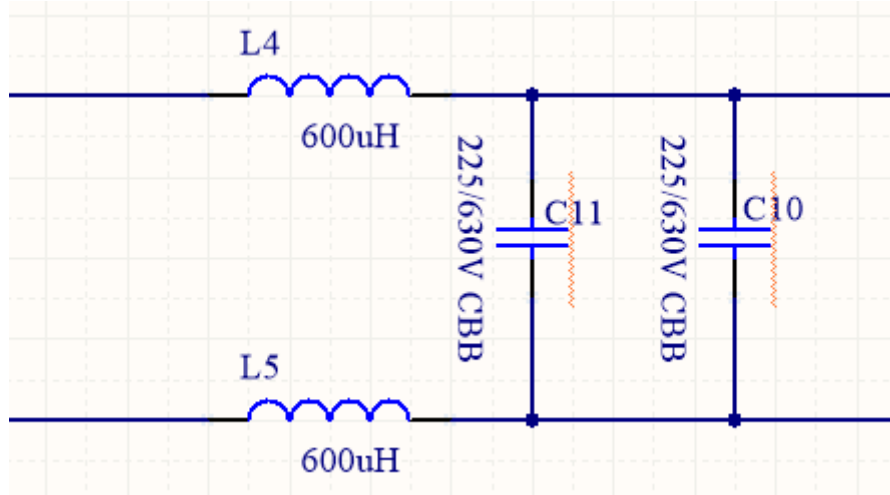


图 3-5 滤波器电路图

3.6 电压、电流检测电路

采样信号是系统完成闭环控制的依据，其精度直接决定系统的控制性能。故而是一个精准的采样电路在系统中是必不可少的。采样电路主要功能是将主电路采集到的交流电压及电流进行调理，再送入单片机进行模数转换与分析运算，而后再对开关管进行控制补偿用以实时调整控制逆变电源的输出。所以本设计采用了电压互感器对电压信号进行采样；采用电流霍尔传感器对电流信号进行采样。输出电压电流互感器进行测量，得到的搜等比缩小的交流输出波形，通过调控电路进行整理后送入单片机进行采集。

电压采样电路如图 3-6 所示，交流电压通过电容隔离后，通过运算放放大得到较大的电压信号，此信号再进行半波整流与 RC 低通滤波器滤波，得到稳定的直流。

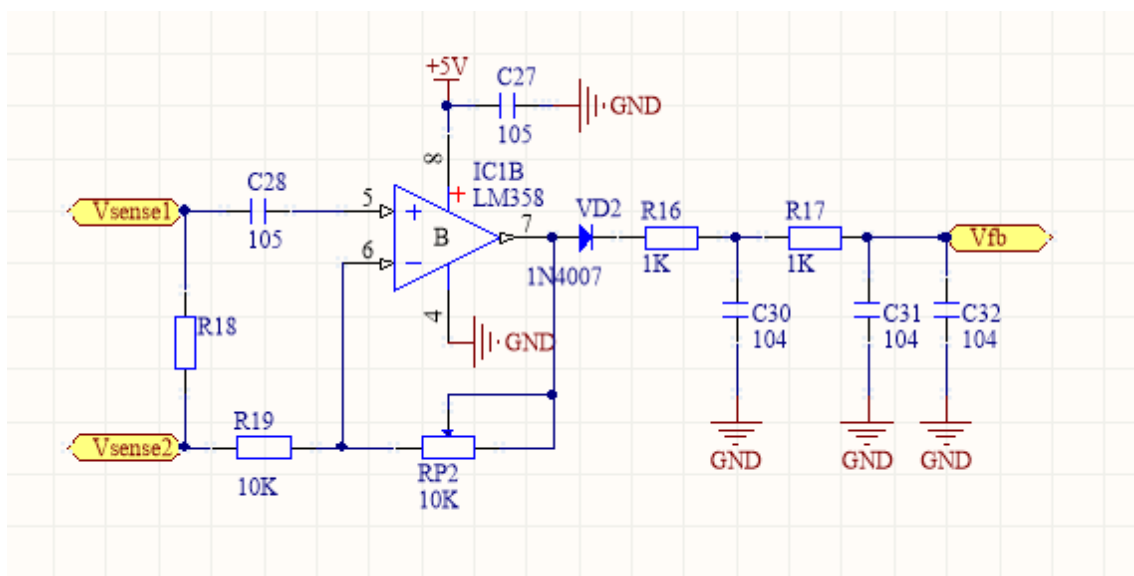


图 3-6 电压采样电路图

电流采样的电路与电压采样基本一致，其电路如图 3-7 所示，不同的是电流采样首先是通过霍尔器件将交流电流转换为交流电压，此交流电压通过电容隔离后，通过运算放大得到较大的电压信号，此信号再进行半波整流与 RC 低通滤波器滤波，得到稳定的直流。

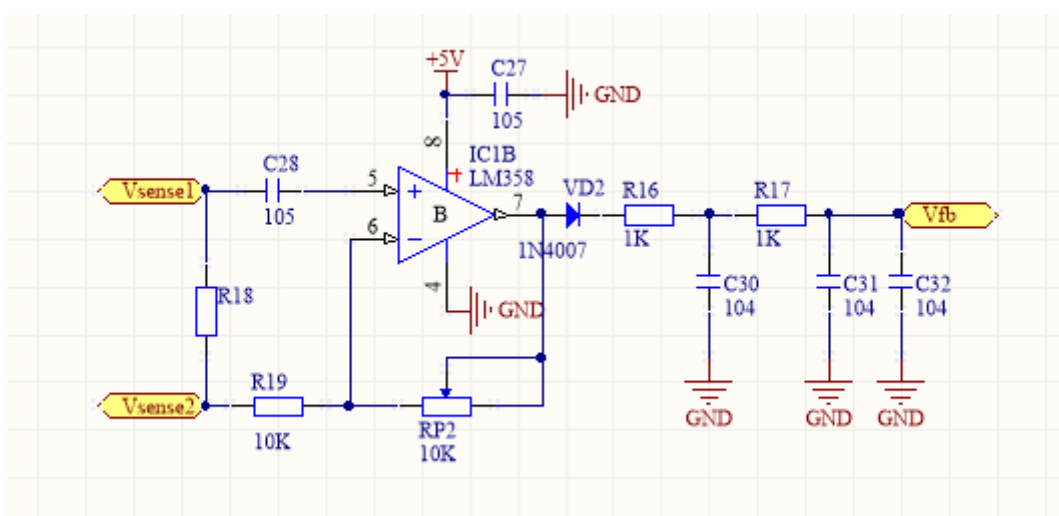


图 3-7 电流采样电路图

4 软件设计

在本设计中软件程序可大致分为调制脉冲输出模块、按键检测模块、ADC 转换模块、液晶显示模块等几个模块，其中调制脉冲输出模块所采用的是单片机的 PWM 模块和定时器模块，其主要功能是输出对逆变全桥进行控制的正弦脉宽调制波（SPWM），这也是本设计中软件程序设计的重难点^[7]。本章将着重描述这一模块的设计思路与实现方法。其余几个模块均是单片机的基础运用，这里将不再过多描述。系统的整体软件流程图如下图 4-1 所示。

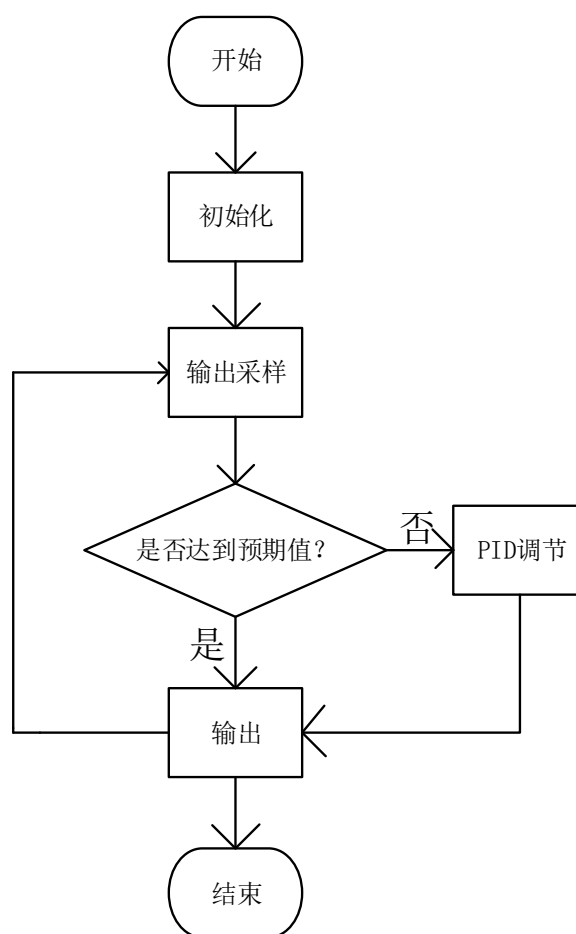


图 4-1 软件流程图

4.1 SPWM 的控制原理

正弦脉宽调制技术是专门应用与逆变电源技术的一种控制算法。其是由 PWM 技术发展演变而来的，基本原理是波形面积等效原理，即将正弦波等效为占空比不同的脉冲方波，此高频方波经过输出低通滤波器即可输出幅值、频率、相位相同的正弦波^[8]。

SPWM 控制技术的基本原理是采样控制理论中的一个经典结论：冲量相等而

形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上是，其效果基本相同。其半周期内的波形图如图 4-2 所示。根据此控制理论即可通过控制单片机输出等比例的 PWM 波来实现 SPWM 波的输出，通过改变单片机输出的方波的占空比大小即可改变逆变器的输出电压。

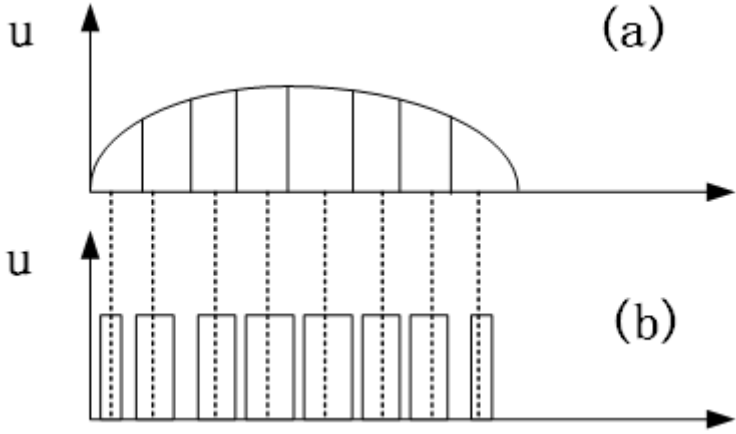


图 4-2 SPWM 波形原理图

4.2 SPWM 信号的调制方式

目前 SPWM 信号的调制方式有很多种，如目前广泛所采用调制方法有单极性三角波调制、双极性三角波调制。这两种调制的共同点是他们的载波都是三角波，调制波都是正弦波，不同点是单极性调制属于半波调制，而双极性调制是全波调制。下面将根据如图 4-3 所示的单相全桥逆变电路为实例来对两种调制方法进行分析对比。

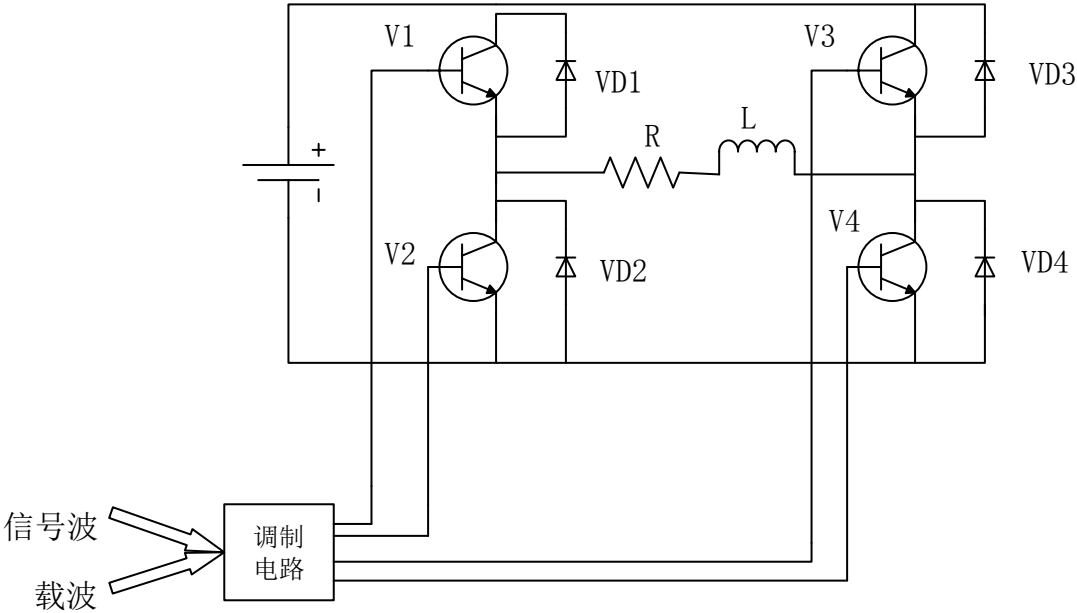


图 4-3 单相全桥逆变电路图

单极性三角波调制的波形如图 4-4 所示。由图可知在正弦波正半周期时三角波为正极性的，在负半周期是三角波为负极性的。在正弦波正半周期时 V2 和 V3 截止，当三角波数值大于正弦波数值时，输出高电平脉冲信号，使 V1 和 V4 导通；当三角波数值小于正弦波数值时，输出低电平脉冲信号，使 V1 和 V4 截止。而在正弦波负半周期时则是 V1 和 V4 截止，当三角波数值大于正弦波数值时，输出高电平脉冲信号，使 V2 和 V3 导通；当三角波数值小于正弦波数值时，输出低电平脉冲信号，使 V2 和 V3 截止。如此反复进行即得到了始终在单极性范围内变化的 PWM 脉冲序列。

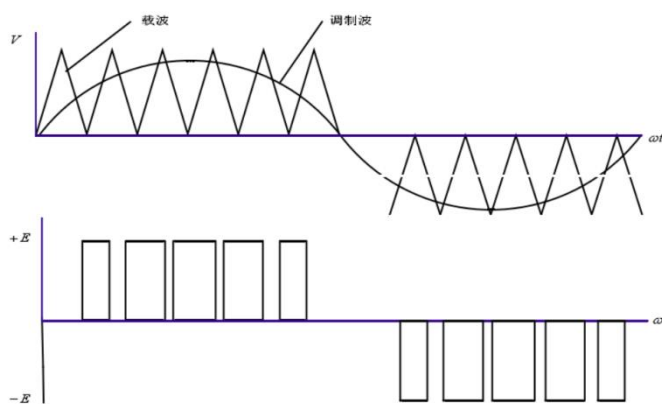


图 4-4 单极性三角波调制波形图

双极性三角波调制的调制波形如图 4-5 所示，他与单极性三角波调制的最大不同就是他在半个周期内即可得到在正负极性范围内变化的 PWM 脉冲序列。单极性三角波调制中的载波在一个半波周期内只有一种极性，而双极性三角波的载波则是具有正负双峰值极性的三角波。其同样是采用载波和调制波比较的方式，当载波大于调制波时 V1 和 V4 导通，V2 和 V3 截止，反之则是 V1 和 V4 导通，V2 和 V3 截止，即同一桥臂上的高侧和低侧开关管交替导通，如此在同一周期内输出的电压波形都同时存在两种极性的波形。

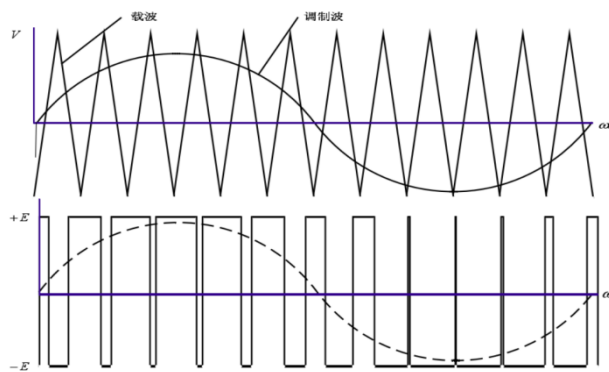


图 4-5 双极性三角波调制波形图

虽然单极性三角波调制的谐波分量较少，输出电流波形较好，但是其算法复杂，不适用于单片机输出 SPWM 波；双极性原理简单，算法也较为简单，实行起来方便，故而本设计中所采用的调制方法为双极性调制。

4.3 SPWM 波的软件生成方法

常用的 SPWM 波生成法有 SPWM 硬件生成法和 SPWM 软件生成法。硬件法就是通过搭建硬件调制电路来实现输出 SPWM 的，此方法电路复杂，元件器繁多，调试难度高，且不利于调节。显然不符合本设计的调频要求。而软件法则利用单片机输出 SPWM 波，此方法简单易学，调试方便，非常适合新手学习，本设计中所采用的便是 SPWM 软件生成法。

利用单片机输出 SPWM 波主要使用到了单片机中的 PWM 模块和定时/计数器模块。如本设计中需要输出 50Hz 的正弦波，那么首先则是在正弦波的一个周期内取 400 个点，每一个点就是一个采样值，利用定时器做中断，每发生一次中断将一个采样值做为重载值赋值给 PWM 模块输出^[9]。如此循环往复，而中断频率则是用正弦波的频率乘以一个周期内分采样数，这样每中断 400 次，即可输出带有一个周期的正弦波的调制波，此调制波驱动全桥电路，再经后级滤波器之后即可得到符合预期要求的正弦波电压了。而调节定时器的中断频率即可改变输出正弦电压的频率了，即可实现本设计中的调频要求。

4.4 闭环控制策略

任何一个系统的稳定工作都离不开反馈控制，本设计也是如此。常规的电源在未引入闭环控制时其输出电压的负载调整率会很高，这显然是不符合电源设计初衷的。本设计中要求输出电压稳定在 25V 所以必须引入电压闭环控制。常用的电压闭环控制策略有两种，一是峰值控制，二是平均值控制。峰值控制的基本原理是不停采集输出电压时实峰值，以此峰值作为反馈量通过与预期值得对比来实现闭环控制；而平均值控制则是通过采集输出电压在一段时间内的平均值，以此值作为反馈量去与预期值做对比，进行闭环控制。峰值控制属于实时控制，对采样速率，采样精度等要求均很高；平均值控制属于延时控制，其对采样速率和精度的要求相对较低。而本设计中的 STM32 单片机的内置 ADC 以及其程序执行速度并不适用于实习控制系统，故而本设计采用的是均值控制策略。

而在自动控制系统中，为了使大多数的控制系统获得良好的闭环控制性能，经常使用 PID 算法，并且根据控制器的输出与输出结构的关系，PID 又划分为位

置式 PID 算法和增量式 PID 算法，其中 P、I、D 分别代表比例、积分、微分，在本设计中主要用到的是增量式 PID。增量式 PID 是根据位置式 PID 算法公式演变而来，其表示为位置式 PID 在 n-1 时刻的控制量，位置式 PID 与增量式 PID 分别如式 4-1 与式 4-2 所示，系统流程图如图 4-6 所示^[10~11]。

$$u[n] = K_p \{e[n] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i] + \frac{T_d}{T} \{e[n] - e[n-1]\}\} \quad (4-1)$$

$$u[n-1] = K_p \{e[n-1] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e[i] + \frac{T_d}{T} \{e[n-1] - e[n-2]\}\} \quad (4-2)$$

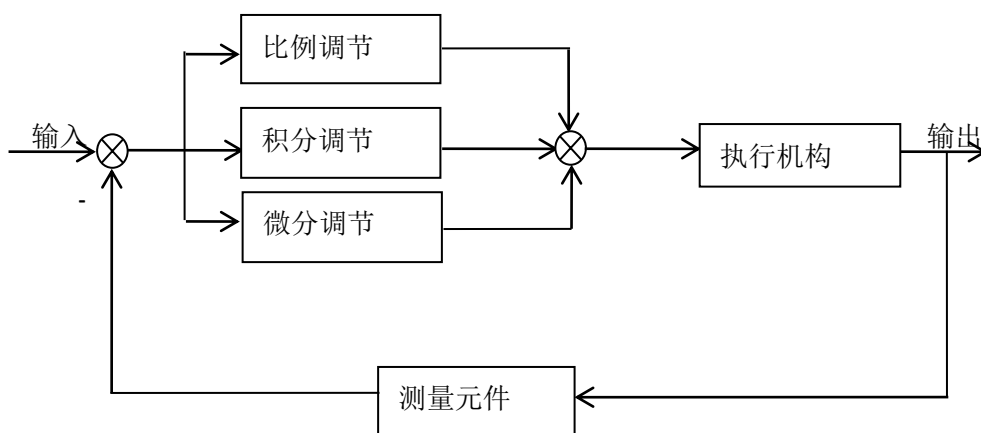


图 4-6 增量式 PID 系统流程图

增量式 PID 具有以下优点：

- （1）其控制输出增量仅与近三次采样值有关，故容易加权控制。
- （2）每次输出的都使执行机构的变化值，不易受系统误差的影响。
- （3）误动作时影响小，必要时可用逻辑判断的方法去掉出错数据。

5 实验结果测试与分析

本设计中所采用的仿真软件是 Simulink，Simulink 是 MATLAB 中的一个软件包，具有强大的动态系统建模仿真与分析功能。在其集成环境中无需书写大量程序，只需要简单的选取模块便可搭建出各种复杂系统。因而广泛的应用于各种线性、非线性、数字控制和信号处理系统的建模与仿真。本设计利用 Simulink 平台来进行双极性调制原理、单相逆变器原理的建模与仿真分析。

5.1 双极性调制仿真与结果分析

双极性调制的仿真原理图如图 5-1 所示，需调制的正弦波与双极性三角波送入过零比较模块即可得到初始的 SPWM 波，SPWM 波再经过隔离升压与反相即可得到用于驱动逆变全桥的所需要的 SPWM 波。

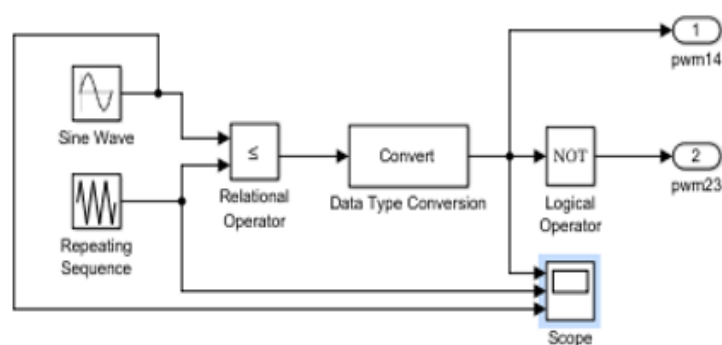


图 5-1 双极性调制仿真原理图

如图 5-2 其中红色波形为调制波，蓝色波为载波，黄色波为调制后的 SPWM 波，由图中波形可看出在载波值大于调制波值时输出 SPWM 波的是高电平，在载波值小于调制波值时输出 SPWM 波的是低电平。

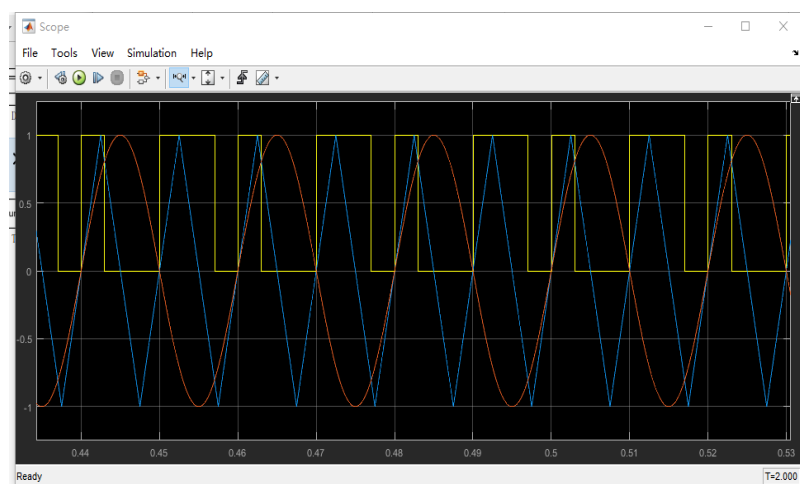


图 5-2 双极性调制仿真结果

5.2 单相逆变器仿真与结果分析

单相逆变器的系统控制仿真图如图 5-3 所示。首先给系统一个基础时钟信号，然后利用正弦波模块将所需要输出的电压波形信息设置好，经过调制模块输出用于驱动逆变全桥的 PWM 波。以采集到的输出电压、电流值做反馈量，利用系统集成的 PID 算法对整个系统进行电压外环电流内环的闭环控制。

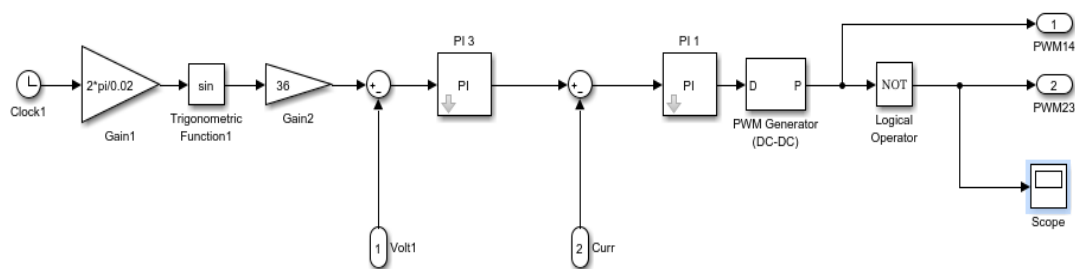


图 5-3 控制系统仿真图

单相逆变器的主功率部分仿真电路图如图 5-4 所示。四个开关管组成全桥，电感电容组成低通滤波器通过电压、电流采样模块对输出电压、电流采样，负载为纯阻性负载，负载阻值为 25Ω 。输入电压为 40V。

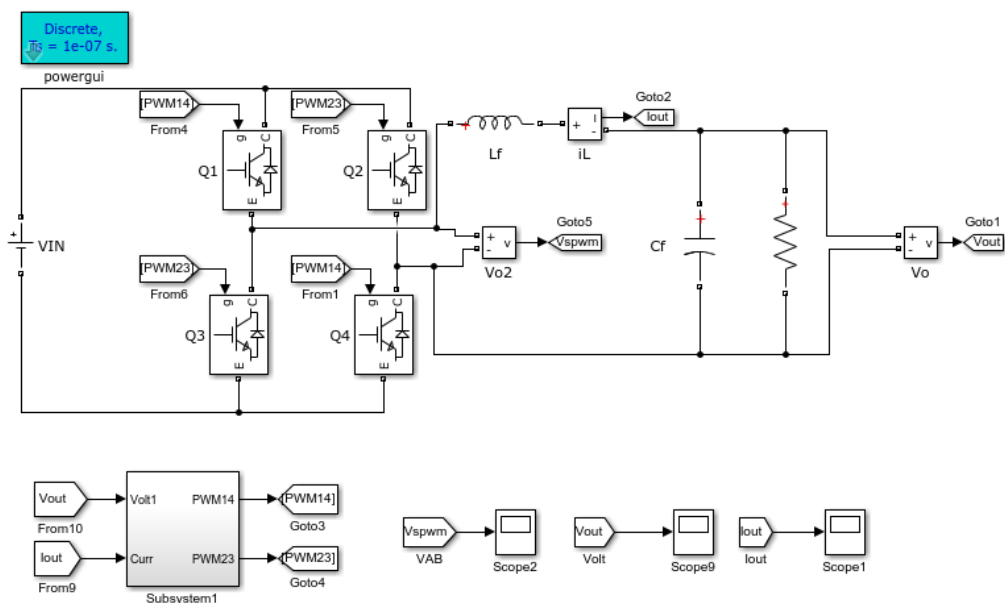


图 5-4 单相逆变器仿真电路图

本单相逆变器的输出电压波形如下图 5-5 所示。由图中参数可知输出电压幅值约为 35V，频率为 50Hz，其有效值即为： $35V/\sqrt{2} \approx 25V$ ，基本达到了预期的设计要求。

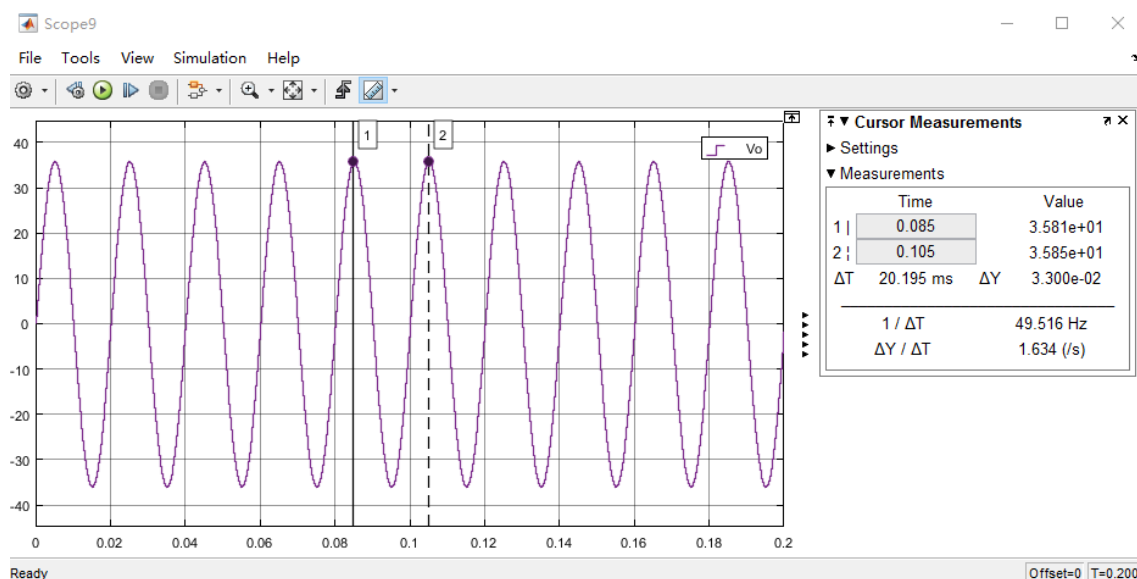


图 5-5 输出电压仿真结果图

其带 $25\ \Omega$ 负载情况下的电流仿真测试波形如图 5-6 所示，其电流波形幅值约为 1.5A，有效值即为 1A 左右，电流频率为 50Hz，且电流波形良好，未发生畸变，达到了系统的预期设计要求。

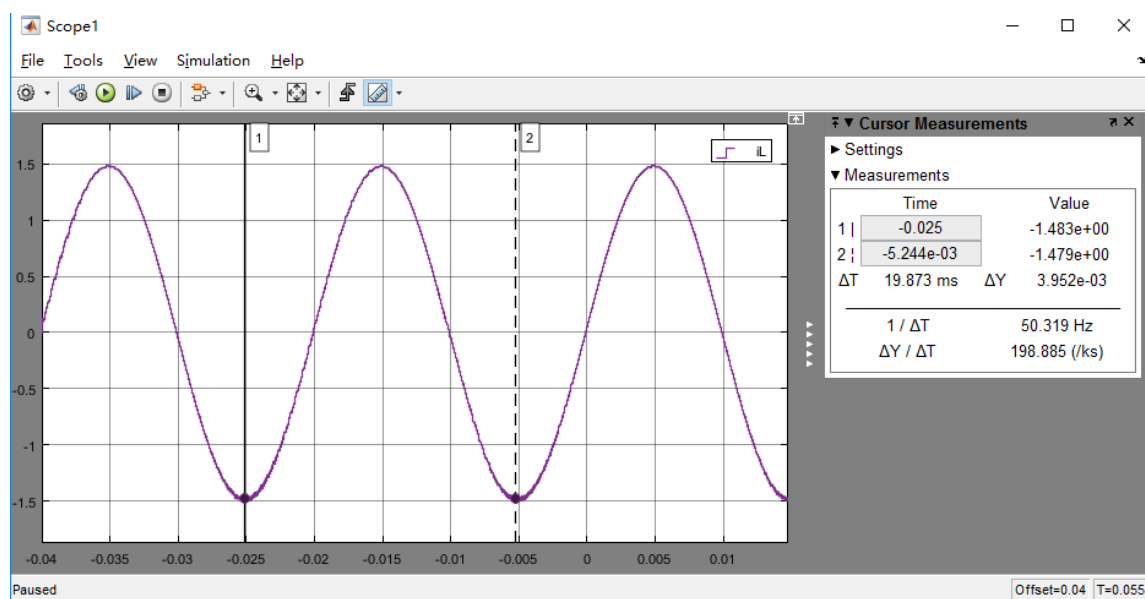


图 5-6 输出电流仿真测试结果图

5.3 单相逆变器实物测试结果分析

本设计系统默认输出的是 25V/50hz 的正弦交流电，实物测试输出波形结果如下图 5-7 所示，使用示波器 $\times 10$ 衰减档测试输出电压波形，输出电压波形为纯正弦波，无畸变，输出电压波形有效值为 24.9V，频率为 50.11HZ。达到了预期的设计目标。

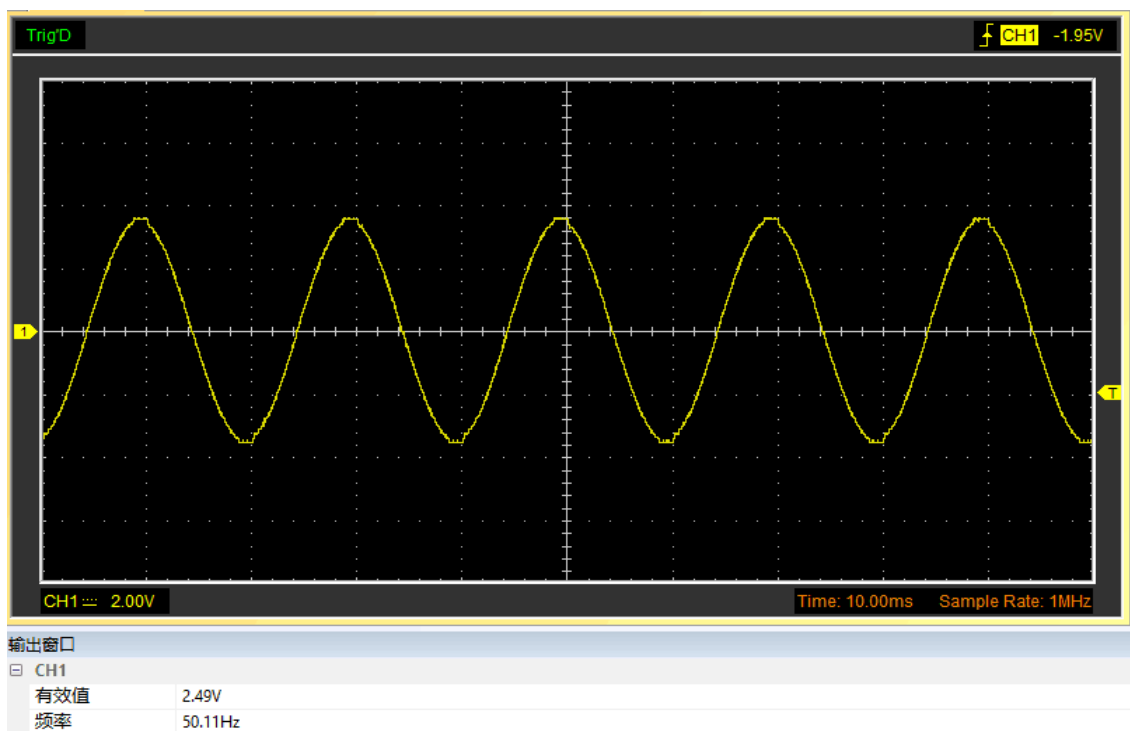


图 5-7 默认输出电压波形测试结果

使用万用表测试实物图如图 5-8 所示，输出端交流电压有效值 25V，OLED 液晶显示值与测试结果一直，显示精度在允许范围内。

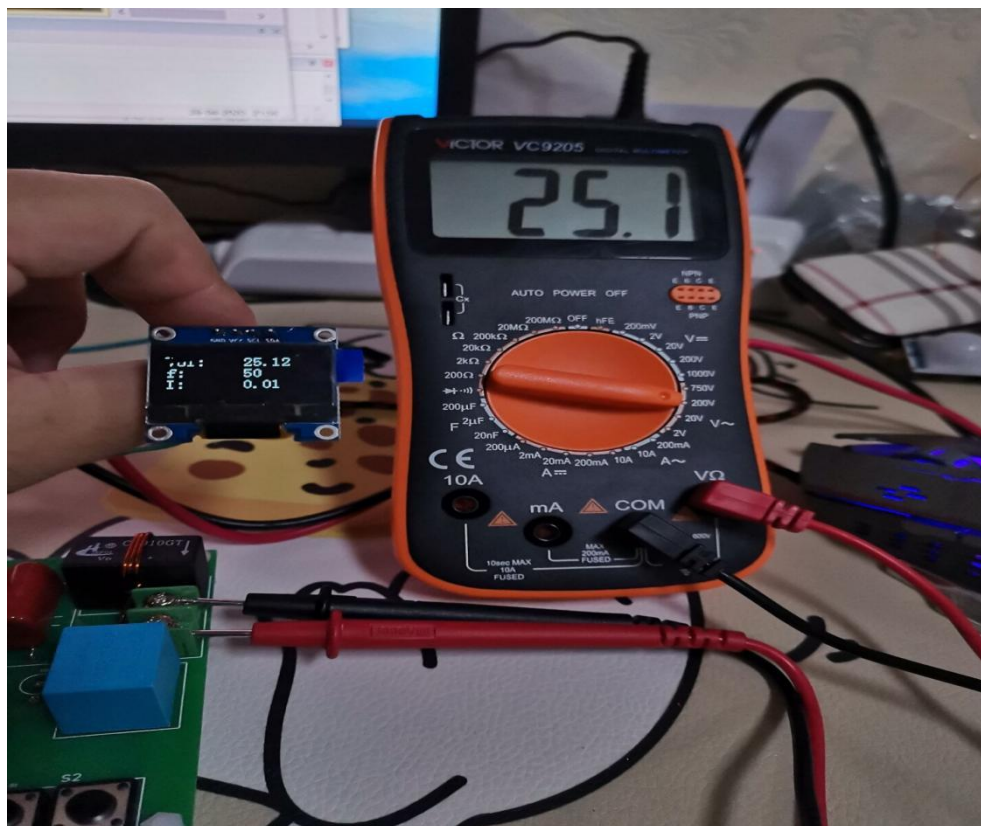


图 5-8 默认输出电压测试结果

带负载测试结果如图 5-9 所示，在输出 25V 有效值交流时带 12 欧姆的功率与负载电阻输出，电路电流为 2.01A，达到了预期的输出 2A 电流的要求。

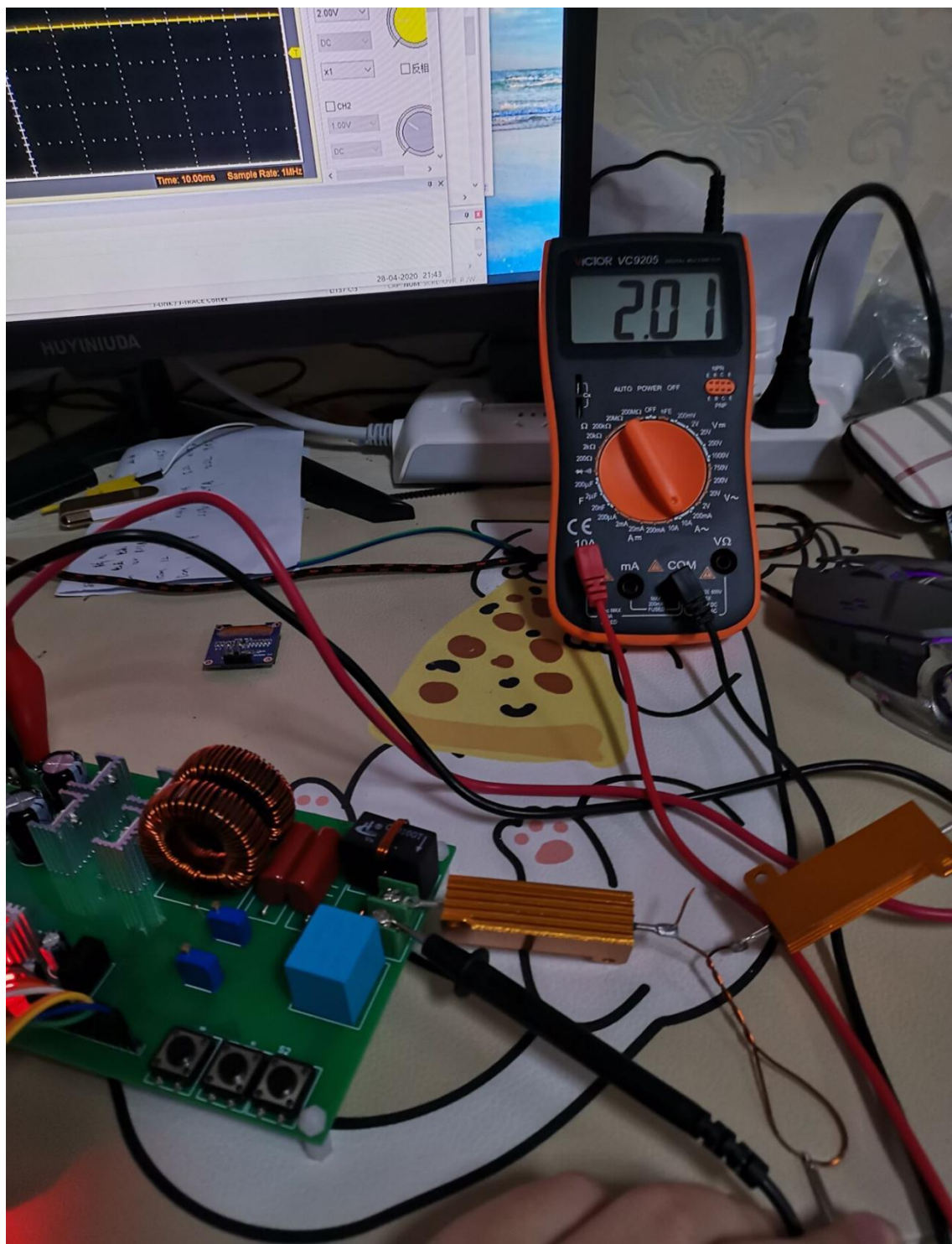


图 5-9 带负载能力测试结果

系统调频功能测试结果如图 5-10 与 5-11 所示，图 5-10 为设计最低 20HZ 频率输出。

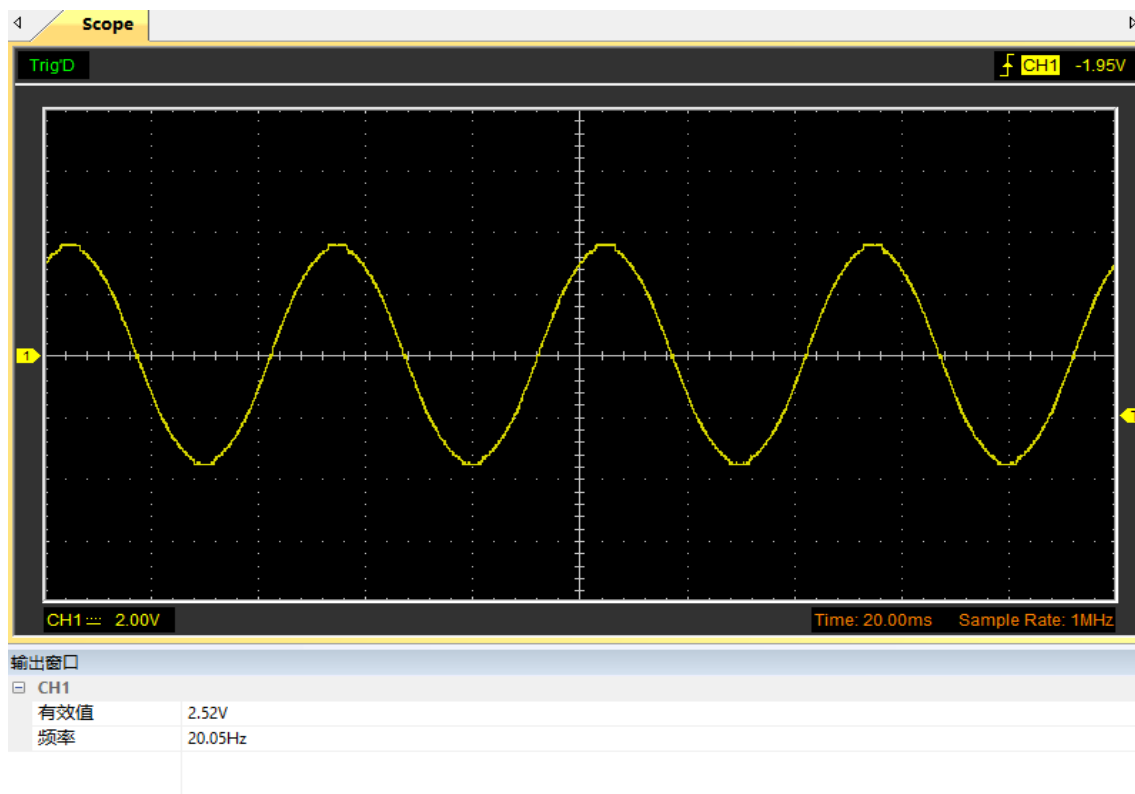


图 5-10 调频最小值测试结果

图 5-11 为输出交流最高频率，预期设计值为 100HZ，实测最高输出频率为 97.30HZ。

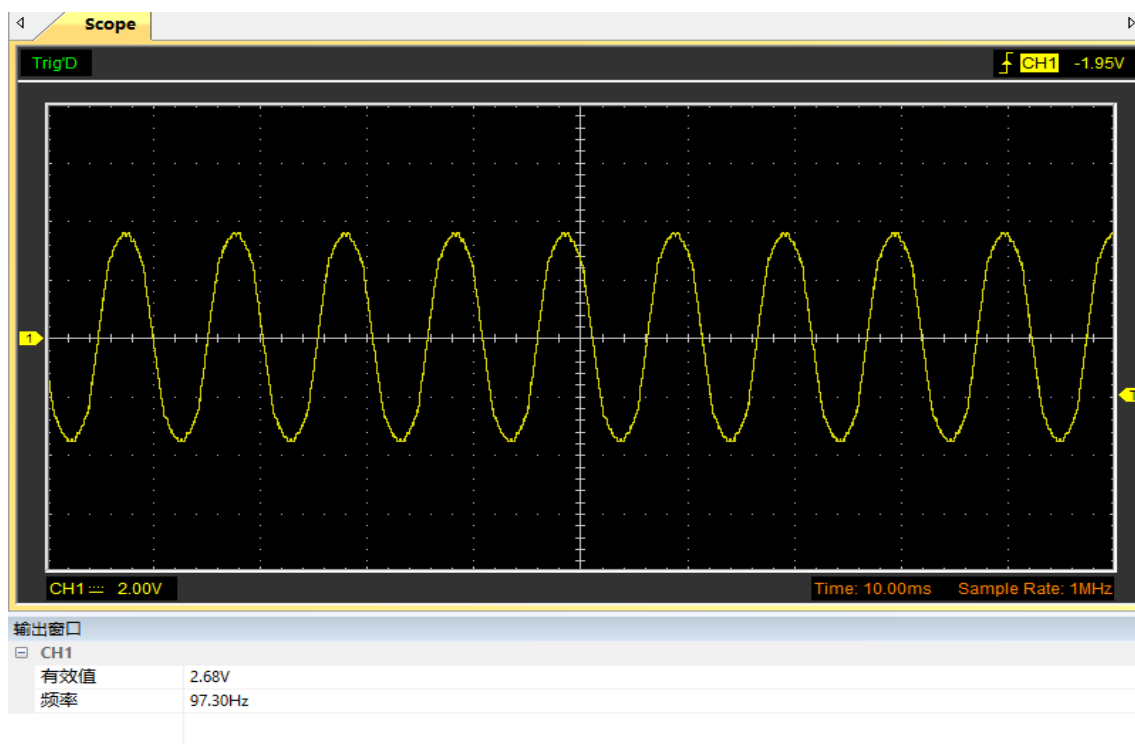


图 5-11 调频最大值测试结果

5.4 数据误差分析

本设计实测测试结果中误差最大的为调频至 100HZ，实际上只达到了 97.3HZ 同预期设计指标差 3HZ 左右，经过程序调试，修改后依旧不能达到预期目标。目前推测导致此误差出现的原因因为单片机的晶振值不够精确所致，单片机中所采用晶振标值为 8M，但实际生产过程中可能由于设备等因素导致其实际值有所偏差。解决方法可采用更换进口高精度晶振替换原本晶振。但因疫情原因，此方案尚无法购买器件进行验证。

系统实物测试中的第二个问题为液晶显示数据刷新速度慢，液晶显示数据无法及时与输出电压电流值匹配。此误差出现的结果推测可能是系统定时器中断优先级最高的为输出 PWM 波的定时器，用于显示的定时器中断优先级最后，加之 ADC 转换过程与 IIC 通信协议中的延时，导致显示数据与实际数据不同步。解决方法为优化程序结构，采用更高级的嵌入式操作系统来编写程序，但此法目前尚未完全掌握。

6 总结

本文以毕业设计制作过程中的理论研究与方案验证实验为基础，首先对所选取的主功率电路拓扑结构进行分析。而后详细介绍了各硬件模块的具体作用以及相关参数设计，软件控制策略与实现方法。最后针对仿真结果与实物测试结果进行统计与分析，基本完成了预期设计的全部要求。由于个人前期在校期间参加电赛已经成功制作出了单相逆变器，所以本毕设对我来说硬件设计较为简单，故而前期主要工作是去了解学习相关的理论基础，以及 STM32 单片机相关知识与应用。在理论学习研究的过程中经常出现前面学习的内容与后面学习的内容相矛盾的情况，此时就需要去动手验证了，只有经过实践验证后的东西才能理解的更加深刻和透彻，正应了古话：纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行！

本文所设计单相变频逆变器具有输出稳定，电压、电流波形良好，无畸变，变频稳定可靠，带负载能力强等优点。但同时其缺点也很明显，即功率较低，不具备较为广泛的实际应用价值，且此设计只对逆变部分进行了设计制作，并不具备一个逆变电源的全部功能。但是逆变电源以其优异的高压传输转换特性必将在今后的工业生产和电力电子行业得到更加广泛的应用。其性能也将不断提高，日益贴近人们的生产生活。

参考文献

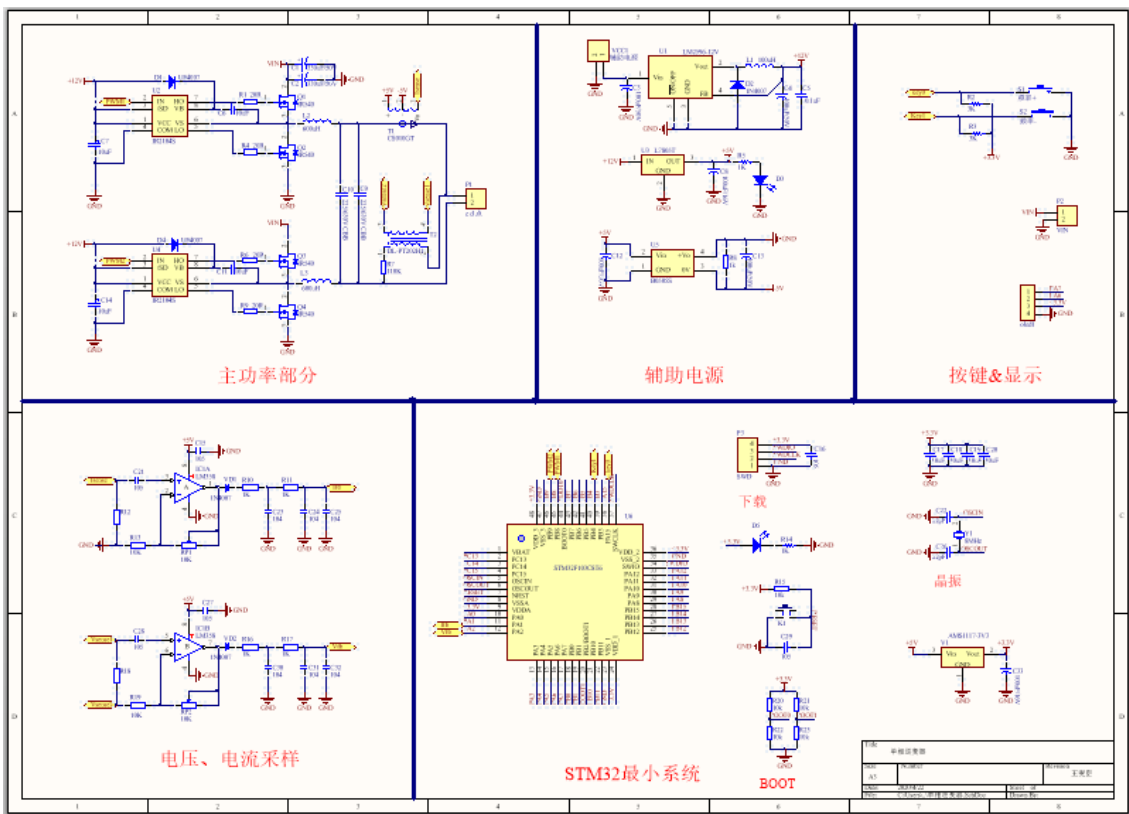
- [1] 任苗苗.数字式单相逆变电源优化控制技术研究[D].天津: 天津工业大学, 2017.
- [2] 刘清萍,王楚莹,张胜.一款基于单片机的高效数控逆变电源[J].通信电源技术, 2019, 36(06): 14-15+18.
- [3] 郭石垒,秦会斌.一种新型单相全桥 SPWM 逆变器设计方法[J].电子器件, 2016, 39 (05) : 1261-1264.
- [4] Christidis G C, Nanakos A C, Tatakis E C. Hybrid Discontinuous/Boundary Conduction Mode of Flyback Microinverter for AC-PV Modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(06): 4195-4205.
- [5] 周红标,应根旺,蒋恒等.基于 STM32 的单相光伏并网发电系统[J].电测与仪表, 2015, 52 (19) : 61-66.
- [6] 侯义东,杨永怀,林方,黄根春.单相正弦波逆变电源[J].电子产品世界, 2014, 21(12): 53-54+68.
- [7] 谭浩强.C 程序设计(第五版)[M].北京: 清华大学出版社, 2017.
- [8] 孙思雅,向付伟,张海亮,王航杰,郑思凡.应用 SPWM 调制 PI 控制的逆变电源综合实验[J].实验技术与管理, 2018, 35(11): 198-202.
- [9] 杨照辉,陈红娟.基于 SPWM 模块化逆变电源的研究与设计[J].电源技术, 2014, 38 (07) : 1349-1351.
- [10] 陈鑫, 贲洪奇.单相变频逆变器直流分量抑制策略[J].电力电子技术, 2017, 51(01): 65-67.
- [11] 李珍珍.一种基于 PID 控制的数控直流稳压电源设计[J].科技视界, 2018, 235 (13) : 133-135.

附录

附录 1 硬件实物图



附录 2 电路原理图



附录 3 电路 PCB 图

