

华中科技大学电子与信息工程系 2012 年 TI 杯电子设计大赛项目总结报告

课 题： 基于 MSP430 的信号产生与分析装置

组 长： 于 宁

组 员： 杨玉婷

组 员： 张 悦

指导老师： 汪小燕

课设时间： 2012-6-25 至 2012-7-5 (W20~W21)

课设成绩：

目 录

1 需求分析	6
1.1 波形发生器任务	6
1.2 基本要求	6
1.3 发挥部分	6
2 设计目标	7
2.1 实现所有基本功能	7
2.2 实现部分扩展功能	8
3 小组成员和任务分工	8
4 方案论证	10
4.1 信号发生模块	10
4.2 控制模块	11
4.3 显示模块	12
4.4 键盘输入模块	13
4.5 幅度控制模块	14
4.6 稳幅输出模块	14
4.7 任意波形模块	15
5 系统总体设计	16
5.1 总体设计思路	16
5.2 主要器件选择	17
5.3 主要元器件清单	18
5.4 理论分析与计算	20

5.4.1	频率调节步进分析	20
5.4.2	幅度调节步进分析	21
5.4.3	系统工作带宽分析	21
5.4.4	系统工作供电电压分析.....	21
6	系统硬件设计与实现.....	22
6.1	AD9833 信号产生电路	22
6.2	NE5532 直流滤除电路	23
6.3	VCA810 压控增益放大电路	24
6.4	THS3001 功率放大电路	25
6.5	自选波形 AD 波形输出电路	26
6.6	其他单元电路	26
6.7	整机电路图.....	27
7	系统软件设计与实现.....	28
7.1	人机交互界面驱动	28
7.2	AD9833 驱动模块	32
7.3	VCA 驱动模块	33
7.4	微调功能逻辑	34
7.5	扫频功能逻辑	35
7.6	任意波形发生模块软件设计	36
7.6.1	PC 端波形绘制软件.....	37
7.6.2	MSP430 端波形产生程序	39
8	系统的测试与结果分析.....	40

8.1 主要仪器仪表	40
8.2 调试电路的方法和技巧	40
8.3 调试故障、产生原因及排除方法	41
8.4 正弦波测试及结果分析	42
8.5 方波测试及结果分析	43
8.6 三角波测试及结果分析	45
8.7 扫频功能测试及结果分析	46
8.8 任意波形测试及结果分析	48
8.9 误差定性分析	51
9 心得与总结	53
10 致谢	54
11 参考文献	54
12 附录	55

表格目录

表格 1: TI 杯波形发生器设计小组成员	8
表格 2: 任务分工列表	9
表格 3: 主要元器件清单	18
表格 4: 运放芯片的增益带宽	21
表格 5: 芯片额定供电电压	22

表格 6: 按键功能 31

图表目录

图表 1: 系统框图 17

图表 2: DDS 原理框图 20

图表 3: AD9833 信号产生电路..... 23

图表 4: LT1221 直流滤除电路 24

图表 5: VCA810 压控增益放大电路..... 24

图表 6: THS3001 功率放大电路 26

图表 7: 自选波形 AD 波形输出电路..... 26

图表 8: 整机电路图 27

图表 9: 界面功能总框图..... 29

图表 10: PORT1 中断流程图 30

图表 11: PORT2 中断流程图 31

图表 12: AD9833 时序图 32

图表 13: 扫频功能流程图 35

图表 14: 任意波形发生模块数据流图..... 36

图表 15: PC 端波形绘制软件界面 37

图表 16: 任意波形流程图 39

图表 17: 5Hz 正弦波..... 42

图表 18: 1MHz 正弦波 43

图表 19: 40Hz 方波	44
图表 20: 20kHz 方波	44
图表 21: 20Hz 三角波	45
图表 22: 300KHz 三角波	46
图表 23: 扫频输出	46
图表 24: 扫频输出(Cont.)	47
图表 25: 扫频输出(Cont.2)	47
图表 26: 任意波形绘制	48
图表 27: 任意波形输出	49
图表 28: 硬件电路实物图	50
图表 29: 硬件电路实物图(Cont.)	50
图表 30: 主菜单	51

1 需求分析

1.1 波形发生器任务

该项目的任务是设计并制作一个波形发生器，该波形发生器能产生正弦波、方波、三角波三种基本周期性波形和由用户自主绘制的任意波形，并根据用户输入选择产生指定类型与参数的波形，同时在必要的辅助输出显示设备上显示产生波形的类型与参数。

1.2 基本要求

- ① 具有产生正弦波、方波、三角波三种基本周期性波形的功能；
- ② 输出波形的频率范围为 100Hz-20KHz（非正弦波频率按 10 次谐波计算）；
重复频率可调，频率步进间隔 $\leq 100\text{Hz}$ ；
- ③ 输出波形幅度范围 0-3V（峰峰值），可按步进 0.1V（峰峰值）调整；
- ④ 由外界按键输入选择产生波形的种类、频率与峰峰值；
- ⑤ 界面显示输出波形的类型、重复频率（周期）和幅度。

1.3 发挥部分

- ① 扩展输出波形频率范围；
- ② 用键盘或其它输入装置产生任意波形；
- ③ 增加稳幅输出功能，当负载变化时，输出电压幅度变化不大于 $\pm 3\%$ （负载电阻变化范围： 100Ω ）；
- ④ 可产生单次或多次特定波形（如产生 1 个半周期三角波输出）；

- ⑤ 增加输入输出信号的路数；
- ⑥ 实现输出信号按指定方式的同步与相位控制；
- ⑦ 提高所设计实现的波形发生器与频率计的量程与精度；
- ⑧ 具有掉电存储功能，可存储掉电前用户编辑的波形和设置；
- ⑨ 通过 VGA 输出接口实现波形发生器与频率计用户界面；
- ⑩ 其它（如增加频谱分析、失真度分析、频率扩展大于 200kHz、扫描输出等功能）。

2 设计目标

2.1 实现所有基本功能

- ① 具有产生正弦波、方波、三角波三种基本周期性波形的功能；
- ② 输出波形的频率范围为 100Hz-20KHz（非正弦波频率按 10 次谐波计算）；
重复频率可调，频率步进间隔 $\leq 100\text{Hz}$ ；
- ③ 输出波形幅度范围 0-3V（峰峰值），可按步进 0.1V（峰峰值）调整；
- ④ 由外界按键输入选择产生波形的种类、频率与峰峰值；
- ⑤ 界面显示输出波形的类型、重复频率（周期）和幅度。

2.2 实现部分扩展功能

- ① 输出正弦波波形频率范围可以在波形不失真且幅度不变的情况下扩展至 5Hz-1MHz ;输出方波波形频率范围可以在波形不失真且幅度不变的情况下扩展至 40Hz-20KHz ;输出三角波波形频率范围可以在波形不失真且幅度不变的情况下扩展至 20Hz-300KHz ;
- ② 通过键盘自由设置或微调规则波形的幅度、频率和相位，幅度步进小于 0.0007V，频率步进小于 0.06Hz；
- ③ 自主设计的用户界面可绘制出任意波形；
- ④ 增加稳幅输出功能，当负载变化时，输出电压幅度变化不大于 $\pm 3\%$ (负载电阻变化范围：100 Ω)；
- ⑤ 具有掉电存储功能，可存储掉电前用户编辑的波形和设置；
- ⑥ 可连续扫频输出正弦波，扫频范围为 5Hz 到 1MHz

3 小组成员和任务分工

表格 1: TI 杯波形发生器设计小组成员

姓名	学号	班级	电话	QQ	邮箱
于宁	U200914045	提高 0901	15271927369	444202106	444202106@qq.com
杨玉婷	U200913810	提高 0901	18986113657	381863462	381863462@qq.com
张悦	U200913864	通信 0904	15271901025	676769652	676769652@qq.com

表格 2:任务分工列表

任 务	于 宁	杨玉婷	张 悦
方案设计	Y	Y	Y
器件选型	Y		
材料购买	Y	Y	
单元电路设计			Y
整机原理图	Y		Y
硬件装调	Y		Y
任意波形		Y	
开发板资源	Y	Y	
功能函数		Y	
界面制作		Y	
单元测试	Y	Y	Y
整机测试	Y	Y	Y
文档撰写	Y	Y	Y
视频制作	Y	Y	Y
PPT 制作			Y
系统答辩展示	Y	Y	Y

4 方案论证

4.1 信号发生模块

➤ 方案一：

采用锁相环间接频率合成(PPL)。锁相环具有工作频率高、宽带、频谱质量好的优点，但是由于锁相环本身是一个惰性环节，锁定时间较长，故频率转换时间较长。另外，由模拟方法合成的正弦波参数(如幅度、频率和相位等)都很难控制，不易实现。

➤ 方案二：

采用传统的直接频率合成法直接合成。利用倍频器、混频器、分频器和带通滤波器完成对频率的算术运算。由于过程当中含有大量的倍频、分频、混频和滤波环节，所以导致直接频率合成器的结构复杂，体积庞大，成本高，而且容易产生过多的杂散分量，难以达到较高的频谱纯度。另外，直接频率合成法的频率很难做高，滤波器设计非常复杂，而且难以实现程控滤波。

➤ 方案三：

采用专用信号发生器。MAX038 是美信公司的低失真单片信号发生器集成电路，内部电路完善。使用该芯片，设计简单，可以生成同一频率信号的各种波形信号。该芯片的缺点是价格过于昂贵。

➤ 方案四：

利用软件计算并存储一个周期的正弦波、方波和三角波的采样点，采用 MSP430F2613 开发板自带的数模转换器直接输出模拟波形。此方案几乎无

需外围硬件，频率幅值精度高，但对软件性能要求高，且频带窄、幅值上限较低。

➤ 方案五：

采用直接数字合成(Direct Digital Frequency Synthesizer,简称 DDS 或 DDFS)。用随机读/写存储器 RAM 存储所需波形的量化数据，按照不同频率要求，以频率控制字 K 为步进对相位增量进行累加，以累加相位值作为地址码读取存在存储器内的波形数据，经 D/A 转换和幅度控制，再滤波即可得所需波形。DDS 具有相对带宽很宽，频率转换时间极短(可小于 20 μ s)，频率分辨率高的优点，且全数字化结构便于集成。另外，DDS 输出相位连续，频率、相位和幅度均可实现程控。

综上所述，DDS 最符合本项目的要求，所以我们决定采用方案四，在本次试验中采用低功耗且价格便宜的 DDS 芯片 AD9833。

4.2 控制模块

➤ 方案一：

采用 89C51 单片机。89C51 单片机是一种 8 位单片机，其指令是采用了复杂指令集(CISC)，共有 111 条指令。CISC 集指令复杂且指令周期长。在功耗方面，89C51 只有两种低功耗方式：待机方式和掉电方式。正常情况下消耗的电流为 24mA，在掉电状态下，其耗电电流仍为 3mA；即使在

掉电方式下电源电压可以下降到 2V，但是为了保存内部 RAM 中的数据，还需要提供约 50uA 的电流。

➤ 方案二：

采用 MSP430F2619 单片机开发板。MSP430 单片机是一种 16 位的单片机，采用了精简指令集(RISC)结构，只有简洁的 27 条指令，大量的指令则是模拟指令，众多的寄存器以及片内数据寄存器都可参加多种运算。这些内核指令均为单周期指令，功能强，运行的速度快。在功耗方面，MSP430 也远优于 89C51，采用了多种低功耗模式。而且 MSP430 输入输出比较多，能够满足需求。此外，MSP430 单片机还引进了 FLASH 型程序存储器和 JTAG 技术。更重要的是，此单片机开发板外围模块丰富，驱动现成，适合迅速上手。

综上所述，基于 MSP430F2619 单片机开发板的众多优点，本项目中我们决定选用其作为主控芯片和主要外围模块。

4.3 显示模块

➤ 方案一：

采用 LED 数码管显示。LED 数码管的优点是功耗低，控制简单，缺点是只能显示数字和一些简单的字符，缺乏良好的人机交互界面。

➤ 方案二：

采用 MSP430F2619 开发板自带的 LCD 液晶显示。LCD 液晶可以显示所有字符及自定义字符，并能同时显示多组数据汉字，字符清晰。由于其自身具有控制器，不但可以减轻 MSP430F2619 单片机的负担，而且可以实现菜单驱动方式的显示结果，实现编辑模块全屏幕编辑的功能，达到友好的人机界面。此外，LCD 接口电路简单，性能好，效果多，控制方便，显示的方式多。

综上所述，LCD 不仅可以克服 LED 显示字符单一和缺乏良好人机交互界面的固有缺陷，各方面的优势也非常明显，故本项目采用 LCD 液晶显示。

4.4 键盘输入模块

➤ 方案一：

采用传统的独立式按键。这种方式占用系统的资源较多，而且效率低下，程序的编写工作繁重而复杂。

➤ 方案二：

采用矩阵(4×4)键盘。矩阵键盘的优点是可以提高单片机的资源利用率。在开关数量多的情况下，使用矩阵键盘可以节省很多的接口，并且提高系统接口的利用率。

综上所述，本项目采用矩阵(4×4)键盘。

4.5 幅度控制模块

➤ 方案一：

采用 DAC0832 作为幅度控制器。利用其内部的电阻分压网络，将其作为数控电位器使用。将 DDS 的输出波形作为 DAC0832 的参考电压输入，其输出波形将为 $V = (N/256) \times V_{in}$ ，其中 N 为单片机输入的幅度控制字。但是由于数模转换的速度限制，在高频时效果并不理想。

➤ 方案二：

采用压控增益放大器 VCA810 和最小系统中的内置 DA 作为幅度控制器。将内置 DA 的输出电压作为 VCA810 的控制电压的输入，通过单片机对 DA 输入幅度控制字，控制 DA 的输出幅度，进而控制 VCA810 的放大倍数。

综上所述，基于 VCA810 对高频更好的适应性，本项目采用 VCA810 作为幅度控制器。

4.6 稳幅输出模块

我们原计划采用峰值检波器获得输出端的电压幅值，经 A/D 采样后得到输出端当前电压的幅值，然后通过与预设输出幅值比较就可以知道输出下降的情况。并由单片机控制放大器的放大倍数，直至幅值调整到预期值。但是实际制作时由于时间比较紧迫，这部分并没有实现。但是经过调试，由于功放级的输出阻抗很小，带负载能力很强，完全能够满足带 100Ω 负载而输出幅度变化小于 3% 的要求。

4.7 任意波形模块

➤ 方案一：

采用触摸屏作为输入接口，采集用户在触摸屏上绘制的图形，并将其存储和显示。触摸屏和单片机之间通过串口进行数据传输。当触摸屏被触及时，它便将触及点的坐标值进行适当的编码，并打包传递给单片机，单片机接收到数据后，对接收到的数据进行适当的处理，然后存储起来，这样就完成了一次波形的输入操作。

➤ 方案二：

采用波形合成方案。用键盘控制波形合成。虽然此方案实现容易且价格便宜，但是合成的波形结果无法确定，无法满足用户期望波形的输出，所以这种方案虽然可以产生各种未知波形，但是未知波形却不可控。

➤ 方案三：

采用和 PC 机通信的方案。在 PC 端编写软件，提供图形化的波形任意波形数据输入界面，用户通过鼠标绘制波形。该软件把绘制的波形转换为字节数据，并通过串口和 MSP430 通信，将数据传输到 MSP430 端。在 MSP430 端，需要编写相应的串口数据接收程序，实现接收来自 PC 机的波形数据功能。MSP430 端此后利用接收到的任意波形数据产生用户需要的信号。

触摸屏虽然使用方便，界面友好直观，但是其编程和控制相对复杂，不适于简单的应用场景；而且其成本较高，针对与本项目而言不宜选用。键盘波形合成的方案，仅能提供的有限的波形种类，而且使用起来较为繁琐，会增加操作的复

杂度；键盘合成对 MSP430 的处理能力也有很高的要求，但是这并非微控制器的长处。

方案三实现起来相对容易。首先，利用 PC 机作为任意波形数据输入的终端，可以省去额外的外部设备，一方面使系统更加小巧简洁，另一方面也简化了 MSP430 端的程序设计。其次，用 PC 机做数据输入，可以提供图形化的友好的人机交互界面，有利于提升用户体验；同时，也充分利用了 PC 机强大的处理能力，减轻了 MSP430 处理数据的负担。另外，MSP430 自带有通用串行接口，和 PC 机间通信十分方便。

综合考虑成本及系统性能，我们决定采用方案三：用户通过 PC 机端的用户界面绘制波形，利用串口将波形数据传送至 MSP430，由 MSP430 产生需要的波形。

5 系统总体设计

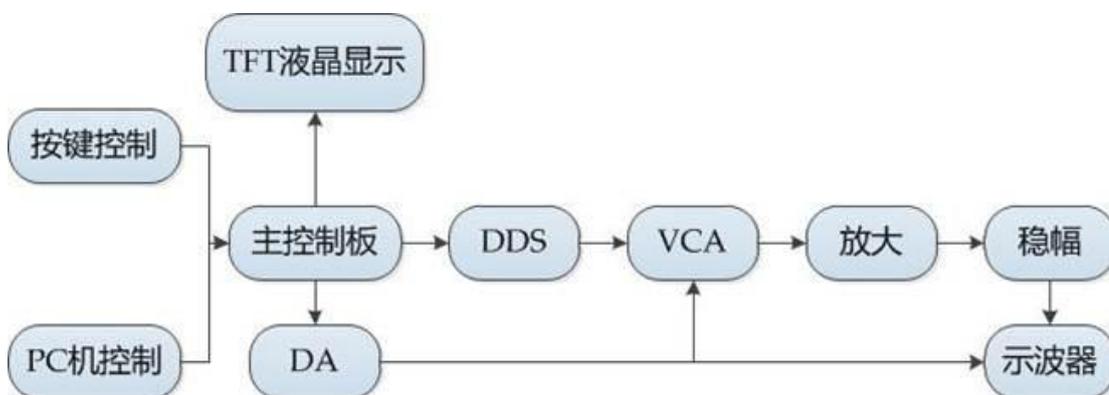
5.1 总体设计思路

本波形发生器项目采用 MSP430F2619 作为单片机控制核心，通过控制 DDS 芯片 AD9833 输出频率精确可控的正弦波、方波、三角波。由于 AD9833 的输出电压含直流偏置且带负载能力稍差，故在 AD9833 后接大电容隔直和电压跟随器，再接入压控增益放大器 VCA810，VCA810 的增益控制电压由 MSP430F2619 通过内部 DA 芯片产生并通过 NE5532 比例放大器进行反向得到，从而实现精确的幅度控制。VCA810 的输出电压增益不足且带负载能力不良，为了增强输出能

力，增大电压放大倍数，同时为了便于电路校准，在末端增加THS3001功放级。

另一方面，对于任意波形，通过开发板上的串口RS232与PC机相连，通过PC机界面获取用户输入波形，发送至MSP430F2619寄存器，再通过另一DAC直接送出模拟电压波形。

系统框图如图所示：



图表 1:系统框图

5.2 主要器件选择

微控制器芯片采用TI公司的MSP430F2619开发板，产生DDS的控制字。其数模转换器、矩阵键盘、LCD显示屏等资源能够满足本系统的需求。

DDS芯片采用ADI公司的AD9833，接收控制字。其成本较低，可以直接输出正弦波、方波、三角波，无需外围的积分电路；而AD9851等DDS芯片不能直接输出方波、三角波，接外围电路将会影响带宽和信号质量。

幅度控制模块采用TI公司的压控调幅器件VCA810，用430输出信号通过DA转换后的电平信号控制。VCA810是高增益调增范围、宽带、高速的压控增益放大器（增益控制以dB为线性），压控增益比例因子为25mV/dB，0V到-2V的控

制电压便可实现80dB的增益动态范围。

数模转换器采用开发板自带的DAC5571，输出自选波形。

运算放大器采用NE5532，实现信号放大和稳压（电压跟随器）作用。

后级功率放大器选择 TI 公司的 THS3001。THS3001 是宽带、高速的电流反馈放大器， $V_{cc} = \pm 5V, R_L = 150\Omega$ 时， $V_o = \pm 3.2V$ 的输出能力完全可以满足设计要求（峰峰值 5.5V）。

LCD显示屏和矩阵键盘均来自开发板自带模块。

其他器件包括晶振、电阻、电容等在此不予详述。

5.3 主要元器件清单

项目中使用到的主要元器件清单如下表所示。

表格 3: 主要元器件清单

编号	名称	功能电路	厂商	数量
01	AD9833BRMZ	DDS	ADI	2
02	VCA810AID	压控增益放大	TI	2
03	THS3001ID	功率放大	TI	2
04	OPA1632D	运算放大	TI	2
05	OPA846IDBVT	运算放大		3
06	NE5532	运算放大		2
07	FR107 二极管			5

08	双面通用板 9*15*1.6		2
09	SOP8 转接板		8
10	SOP14 转接板		2
11	SOP28 转接板		2
12	单排针		5
13	单排针座		5
14	IC-16P 排针帽		1
15	跳线帽		10
16	杜邦双头镀锡导线 1P		20
17	杜邦双头镀锡导线 2P		20
18	杜邦双头镀锡导线 3P		10
		47	5
		500	5
		1k	5
19	电阻	1.2k	5
		5.1k	5
		10k	5
		100k	5
		103	5
20	瓷片电容	104	10
		201	5

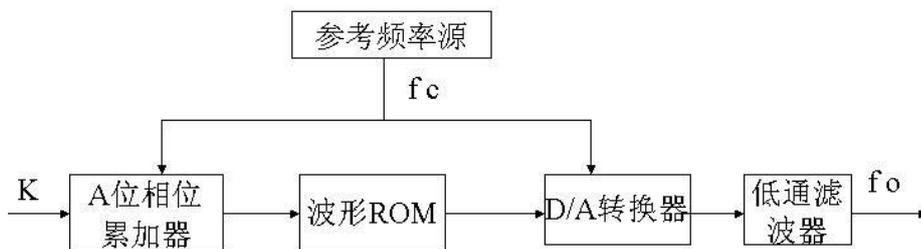
		0.1u	5
		1u	5
21	电解电容	4.7u	5
		10u	5
		100u	5

5.4 理论分析与计算

5.4.1 频率调节步进分析

直接数字频率合成技术 (DDS) 技术，其组成为地址发生器、存储器、数模转换器及低通滤波器。采用这种纯数字化的方法，产生信号的频率准确，频率分辨率高。我们选用的芯片 AD9833 拥有 28 位频率寄存器，外接开发板 16MHz 时钟，故频率步进为 $16MHz / 2^{28} = 0.06Hz$ ，满足步进小于 100Hz 的要求。

DDS 的原理框图如图 2 所示：



图表 2: DDS 原理框图

5.4.2 幅度调节步进分析

输出幅度范围为 0~3V，本系统中采用的是开发板自带的 12 位 D/A 转换输出作为 VCA810 的增益控制电压，故幅度最小步进为 $3V / 4096 = 0.0007V$ ，可以满足步进 0.1V 可调的要求。

5.4.3 系统工作带宽分析

下表罗列了本项目所有运放芯片的带宽增益积：

表格 4:运放芯片的增益带宽

运放芯片	带宽增益积(MHz)
VCA810	25
THS3001	420
NE5532	10

考虑到 AD9833 输出的无失真正弦波的峰峰值为 0.6V，为获得最大 3V 的电压输出，运放增益至少为 5，故所有芯片级联后，在电压增益为 5 的情况下，系统工作带宽可达 2MHz，满足要求输出频率上限 200kHz。

5.4.4 系统工作供电电压分析

下表罗列了本项目所有芯片正常工作时的供电电压范围：

表格 5:芯片额定供电电压

芯片	供电电压范围(V)
AD9833	2.3—5.5
VCA810	± 3.5--5
THS3001	±3.5--15
NE5532	±3--20

保证系统正常工作的前提下,为使系统供电安全,本项目统一采用±3.5V 直流稳压源供电。

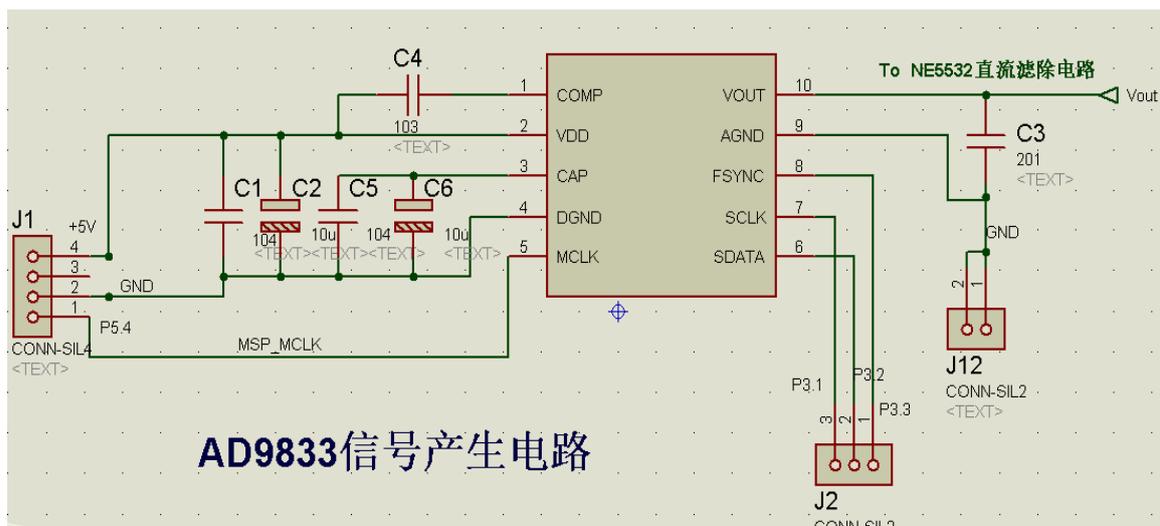
6 系统硬件设计与实现

6.1 AD9833 信号产生电路

AD9833 的主要特点如下：

可选择正弦波、三角波、方波输出；2.3V-5.5 的宽范围电源电压；输出频率范围为 0MHz - 12.5MHz；工作电压为 3V 时，功耗仅为 12.65mW；频率和相位可数字编程；频率寄存器为 28 位(在 25MHz 的参考时钟下,精度为 0.1Hz) (25MHz/2²⁸)；无需外围电路；3 线 SPI 接口。

下图是 AD9833 信号产生电路图。



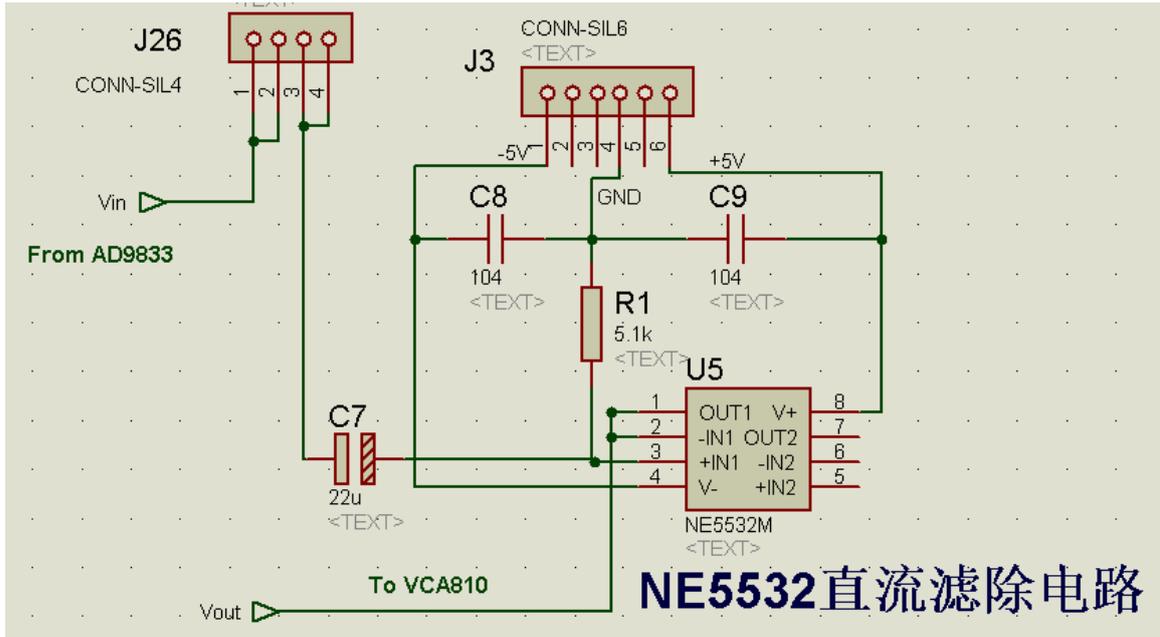
图表 3:AD9833 信号产生电路

由电路图可以看到，AD9833 正常工作时不需要外围电路，仅需要一个外部参考时钟和一个解耦电容。图中，MCLK 为来自于有源晶振的时钟信号。P5.5，p5.6 和 p5.7 分别为 MSP430 的 I/O 端口，用以传送控制 AD9833 输出特定波形和频率的信号。输出端并联一个接地的电容用以滤除高频成分。另外，Vout 为是有直流偏置的输出，鉴于此原因，需要在 AD9833 的电路后面搭建一个直流滤除电路。

6.2 NE5532 直流滤除电路

为了消除 AD9833 输出信号中所包含的直流偏置，设计了 NE5532 直流滤除电路以达到滤除直流成分的目的。滤除直流有多种方式，这里我们采用的办法是电容外加运算放大器，组成隔直交流跟随电路。这样一来，不仅滤掉了直流，而且电压跟随电路可使得电路更稳定。

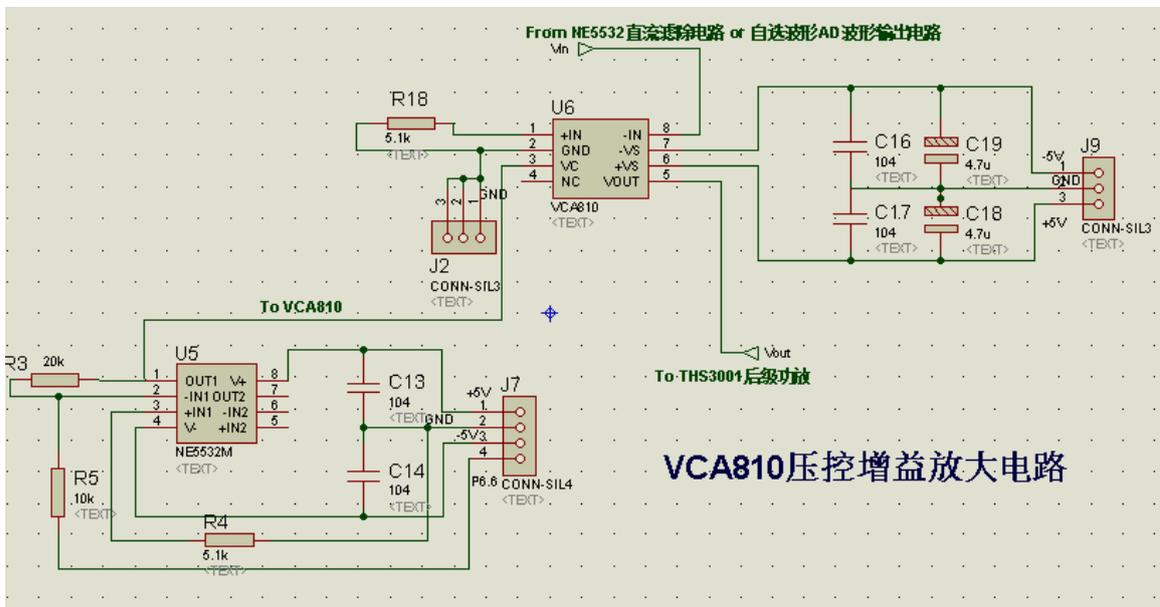
下图是 NE5532 直流滤除电路。



图表 4: LT1221 直流滤除电路

6.3 VCA810 压控增益放大电路

如图所示即为 VCA810 压控增益放大电路。



图表 5: VCA810 压控增益放大电路

其中，DA0832 D/A 转换将 MSP430 通过 I/O 送出内部 D/A 控制的模拟信号，并将该模拟信号通过 NE5532 进行反向，作为压控增益放大器件 VCA810 的增益控制电压（0~-2V）。VCA810 的增益 $G_{v/v} = 10^{-2(V_c+1)}$, $V_c \in [-2, 0]$ （以 dB 为单位）和控制电压成线性关系，比例系数为 25mV/dB，只需-2V 左右的控制电压便可实现增益的全范围控制。其增益范围由 MSP430 直接控制。

实际应用中，DAC 只能输出正电压并且在 1V 以内电平比较稳定，因此通过一个反相放大器将 DAC 输出电压方向并同时将其增大至两倍再赋给 VCA 模块以控制电平。在实际调试中，发现 VCA810 的增益并不是严格按照上述公式变化的，我们假设 VCA 输入控制电压为-1V 时的增益为 1，假设其增益的分贝为线性变化，根据增益上的两点就可以修正增益的系数，将 2 改为 1.58，由此可得新的增益表达式 $G_{v/v} = 10^{-1.58(-2V_c+1)}$, $V_c \in [-2, 0]$ 。

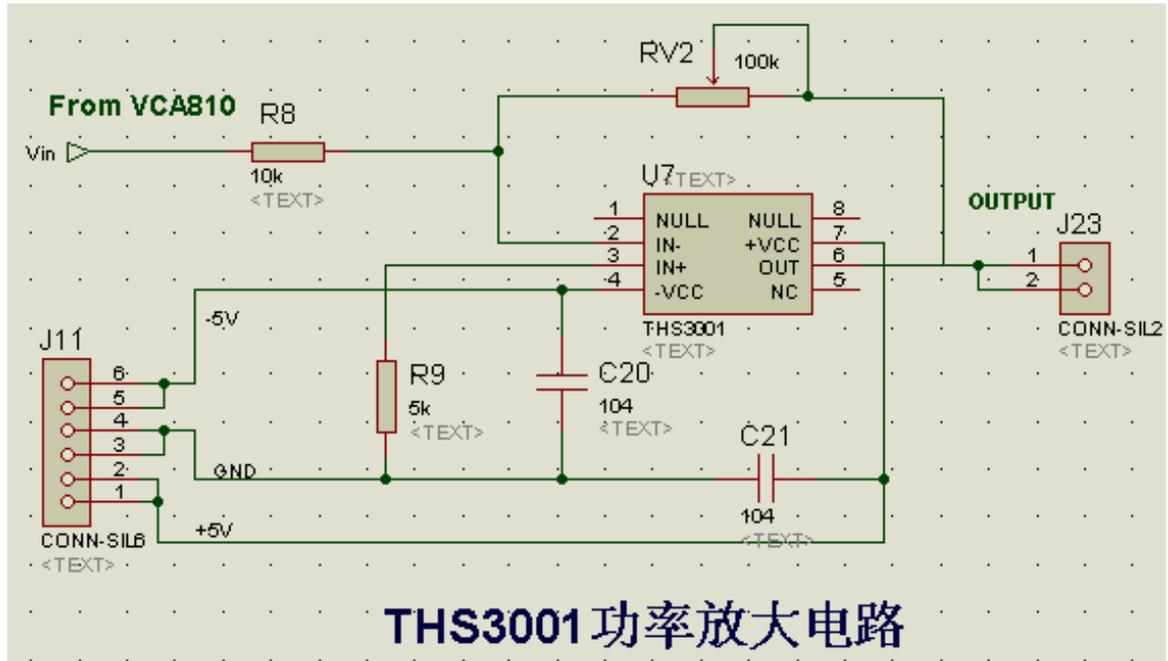
微控制器的 0~1V 对应着 VCA810 压控增益电压的 0~-2V。VCA810 的带宽和压摆率等其他参数都远远超过本项目对器件性能的要求。

6.4 THS3001 功率放大电路

为了增强系统的带负载能力，在信号输出端增加功率放大模块，采用 THS3001 功率放大器。

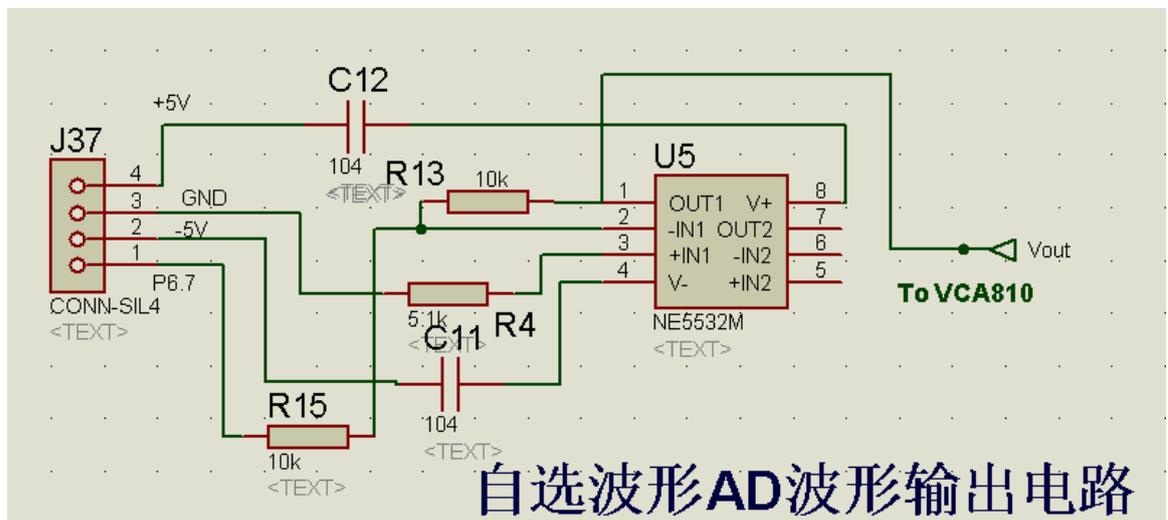
运算放大器 THS3001 负载驱动能力出色，而且 THS3001 是高速宽带器件，能够满足 200kHz，5V 峰峰值的输出要求。

电路如下图所示。



图表 6: THS3001 功率放大电路

6.5 自选波形 AD 波形输出电路



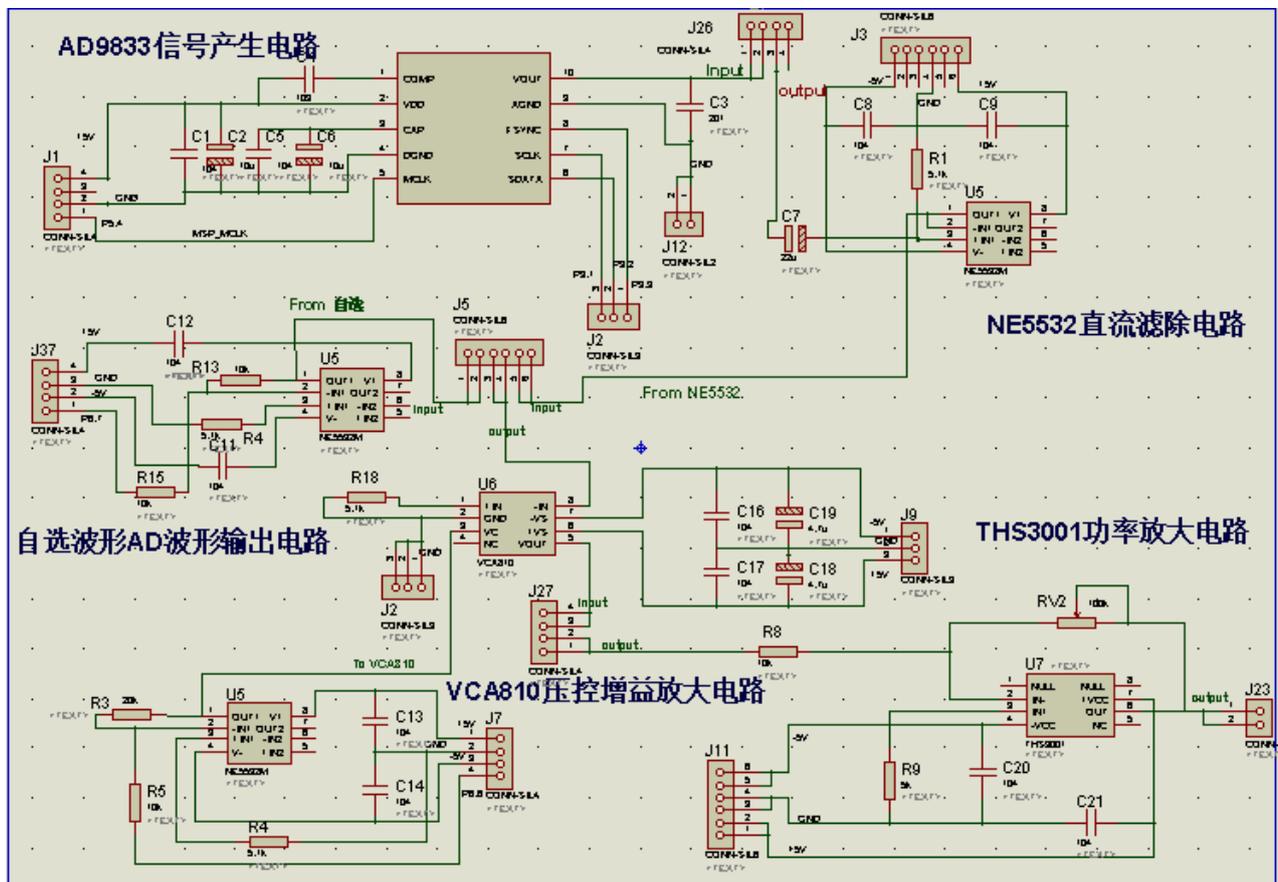
图表 7:自选波形 AD 波形输出电路

6.6 其他单元电路

其他单元电路包括：单片机控制电路、电源、键盘、液晶、晶振、串口（或 USB 等其他调试接口）等等，大部分都集成在开发板上,并通过单片机的 I/O 接

口和单片机进行交互,故该部分电路不再画出。其中,由于和单片机交互基本上是通过单片机的 I/O 口,故单片机控制电路不再画出。键盘、液晶也有标准的接口,故其控制电路也暂不给出。由于电路仿真软件 Proteus 不含 AD9833,故只能对局部电路进行单元电路仿真。

6.7 整机电路图



图表 8:整机电路图

7 系统软件设计与实现

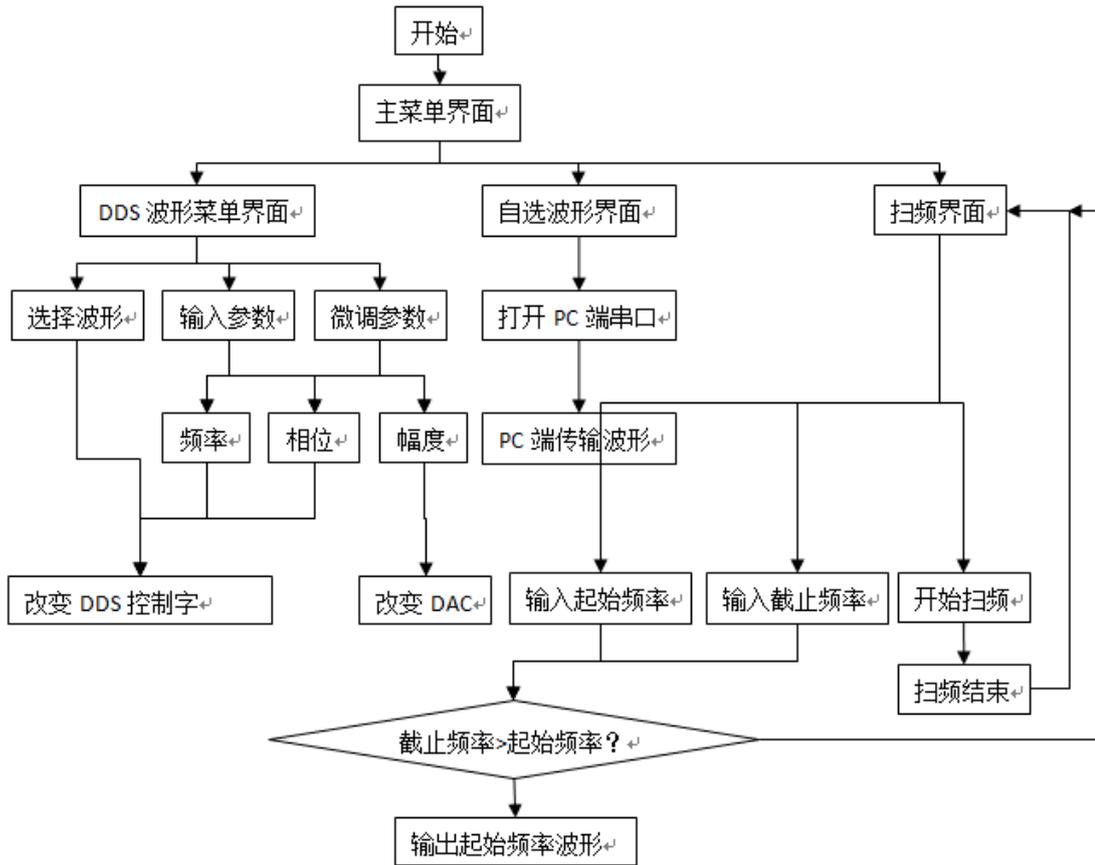
7.1 人机交互界面驱动

输入方面，本程序中采用两组按键，独立按键使用 MSP430 的 PORT1 中断控制，用来进行选择操作，如菜单上下选择及每级菜单的进入、退出。矩阵式 4*4 键盘使用 MSP430 的 PORT2 中断控制，用来进行数值的输入，如频率、相位以及幅度的输入。

输出方面，使用 LCD 液晶显示屏进行输出，并构造一个虚拟光标用来选择菜单，使人机交互界面友好。

程序共有 13 级菜单，其中，频率、幅度及相位输出菜单需要 4*4 矩阵键盘的输入，其他菜单均由独立键盘控制。在存在菜单选择的界面中，独立键盘的上、下按键使相邻的菜单列字体及背景颜色互换，制造出虚拟光标移动的感觉。进入按键使得菜单进入相应的下一极菜单，而左键使得菜单退回上一级菜单。

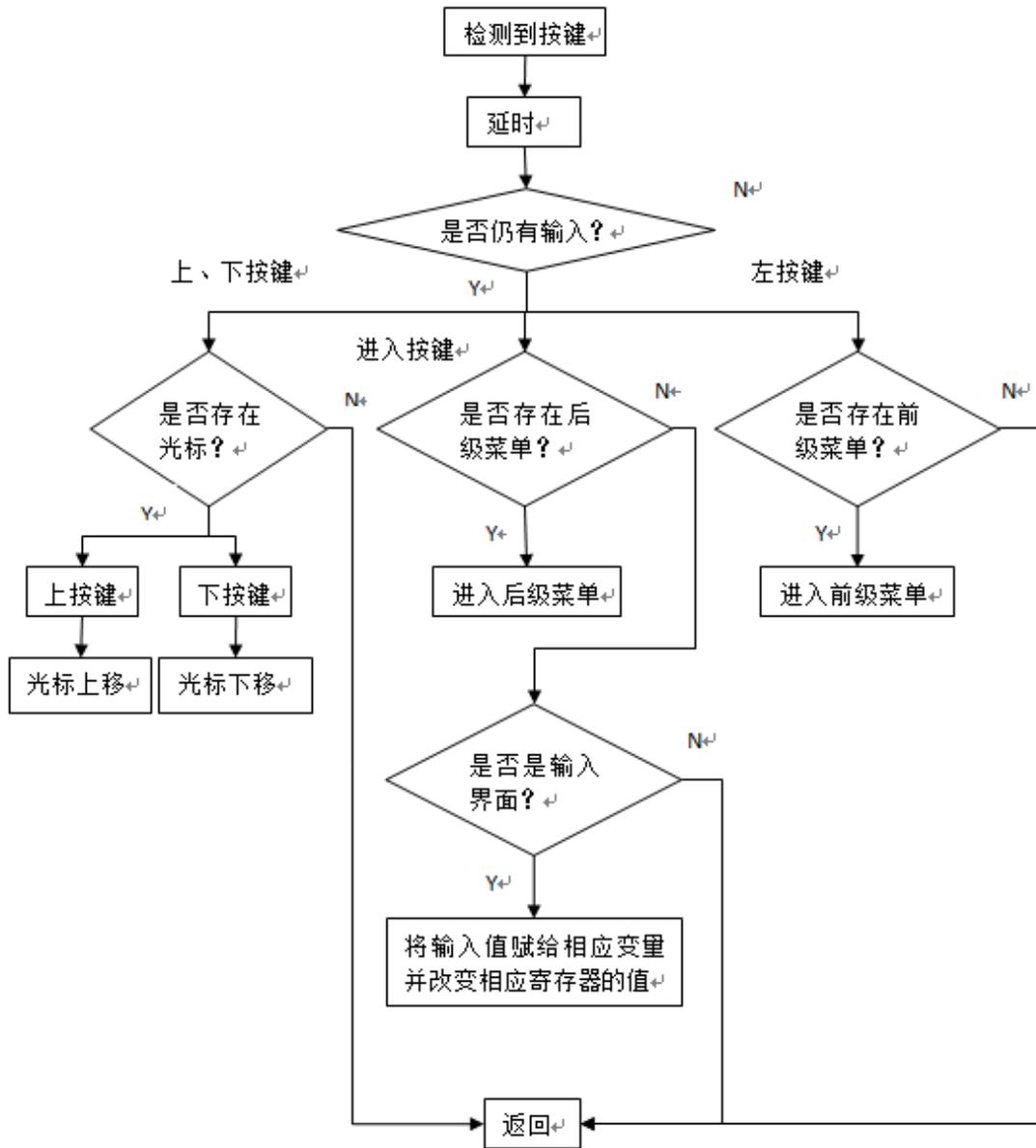
界面功能总框图如下：



图表 9:界面功能总框图

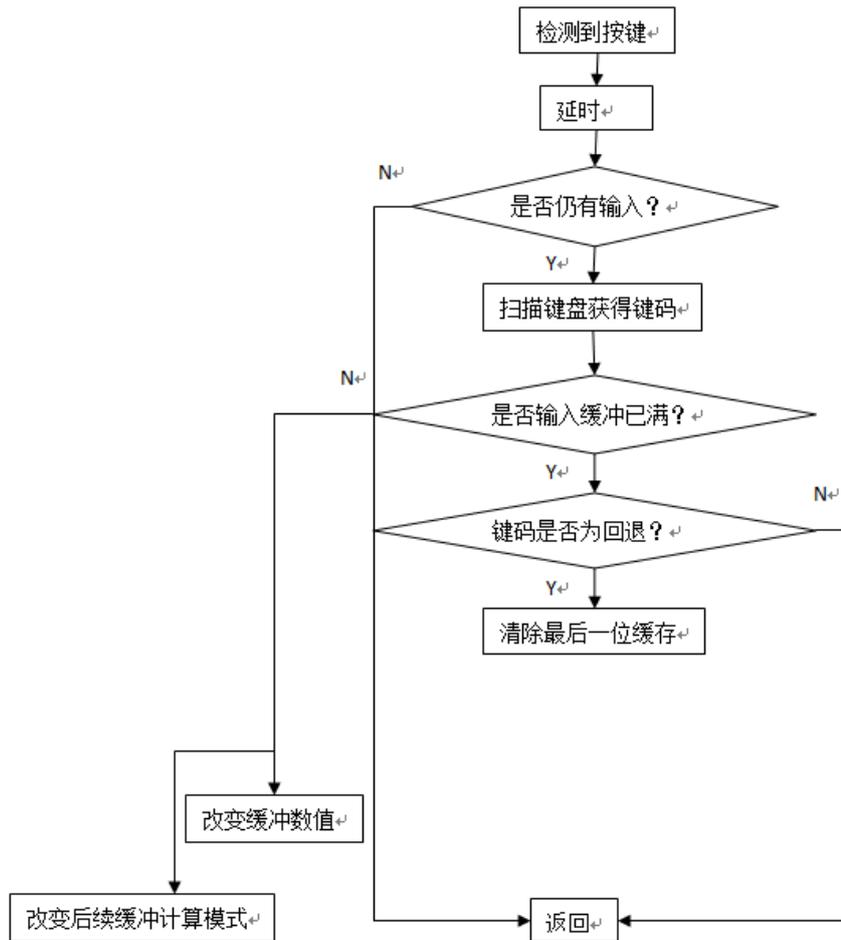
在数据输入界面中，每键入一个值，即扫描得到该键的键码并返回相应的数值，判断输入是否合法，如果合法，则根据键入的值改变频率、相位、幅度等值。

PORT1 中断流程图如下：



图表 10: PORT1 中断流程图

PORT2 中断流程图如下：



图表 11: PORT2 中断流程图

全部按键功能如下：

表格 6:按键功能

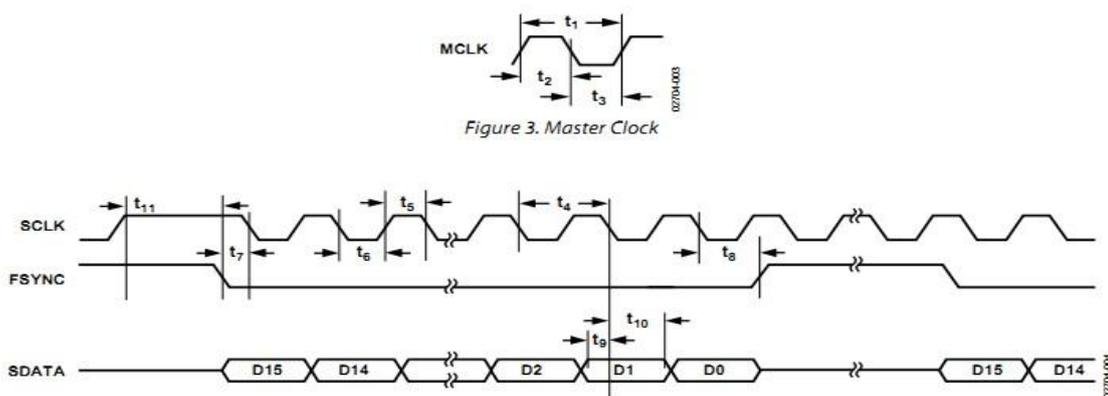
按键名称	功能名称	功能
K1~K10	0~9	实现数字输入
K11	.	实现小数点的输入
K12	回退	在数值输入时消除上一位输入
K13, K14	K, M	数值输入的尾缀，使数值增倍
ENTER	进入	进入下一级菜单、数值输入时完成输出、扫频时开始扫频

UP, DOWN	上, 下	上下选择菜单、微调时以最小步长增加或减小参数
LEFT	左	退回上一级菜单

7.2 AD9833 驱动模块

AD9833 是 ADI 公司的一款 DDS 芯片，它是一款低功耗、可编程波形发生器，能产生正弦波、三角波和方波输出。各种类型的传感、激励和时域反射仪应用都需要产生波形。输出频率和相位可通过软件进行编程，以便于调谐。无需外部元件。频率寄存器为 28 位；当时钟速率为 25 MHz 时，可以实现 0.1 Hz 的分辨率。同样，当时钟速率为 1 MHz 时，可以实现 0.004 Hz 的分辨率。AD9833 通过一个三线式 SPI 串行接口写入数据。

时序图如下：



图表 12: AD9833 时序图

当 FSYNC (帧同步) 信号拉低时，开始传输数据，在每一个周期的 SCLK (串行时钟) 由 SDATA (串行数据) 线传输 1 个 bit 的数据。AD9833 共有 2 个 28bits

的频率寄存器和 2 个 12bits 的相位寄存器，通过 SDATA 将控制字和频率相位数据写到相应的寄存器，实现对频率和相位的调整。由 DDS 的原理可知：

$$f_{out} = M \times f_{MCLK} / 2^{28}$$

其中，M 为频率寄存器的控制字，f_MCLK 为外接时钟频率本实验外接时钟来自于 MSP430F2619 开发板，为 16MHz，可实现 0.016Hz 的分辨率。该驱动模块主要由以下三个函数产生：

在 Init_SPI()函数中，程序首先使能相关引脚，并模拟出一个周期的 SCLK 波形，再对 AD9833 输入一个初始化控制字。

在 Send_Word()函数中 程序通过模拟 SCLK、SDATA 以及 FSYNC 的时序，对 AD9833 输入一整个控制字。

在 GenerateWave()函数中，程序通过输入的 Mode 变量得之需要输出的波形，并依此给出控制寄存器的值，通过 Frequency 变量得到需要输出的频率，依此给出频率寄存器的值。在向 AD9833 输出控制字的过程中，第一个控制字令 RESET 位置一，设置所使用的频率寄存器以及相位寄存器并设置所输出的波形，防止 AD9833 在配置频率、相位寄存器过程中出现虚假输出。第二、三个控制字输出频率寄存器的值，先送低位后送高位。第四、五个控制字输出两个相位寄存器的值。第六个控制字将 RESET 位置 0，其他和第一控制字一样，以使 AD9833 输出正确的波形。

7.3 VCA 驱动模块

理论上，VCA810 的增益为

$$G_{v/v} = 10^{-2(V_c+1)}, V_c \in [-2, 0]$$

因此，在学习板上令数模转换模块输出不同的直流电平给 VCA 就可以调节电压增益，实现波形幅度的控制。VCA 的有效控制电压为 0~-2V，而在实际应用中，DAC 只能输出正电压并且在 1V 以内电平比较稳定，因此通过一个反相放大器将 DAC 输出电压反相并同时将其增大至两倍再赋给 VCA 模块以控制电平。在实际调试中，发现 VCA810 的增益并不是严格按照上述公式变化的，我们假设 VCA 输入控制电压为 -1V 时的增益为 0dB，假设其增益的分贝随 V_c 线性变化，根据增益上的两点就可以修正增益的系数，将 2 改为了 1.58，最终得

$$G_{v/v} = 10^{-1.58(-2V_c+1)}, V_c \in [-2, 0]$$

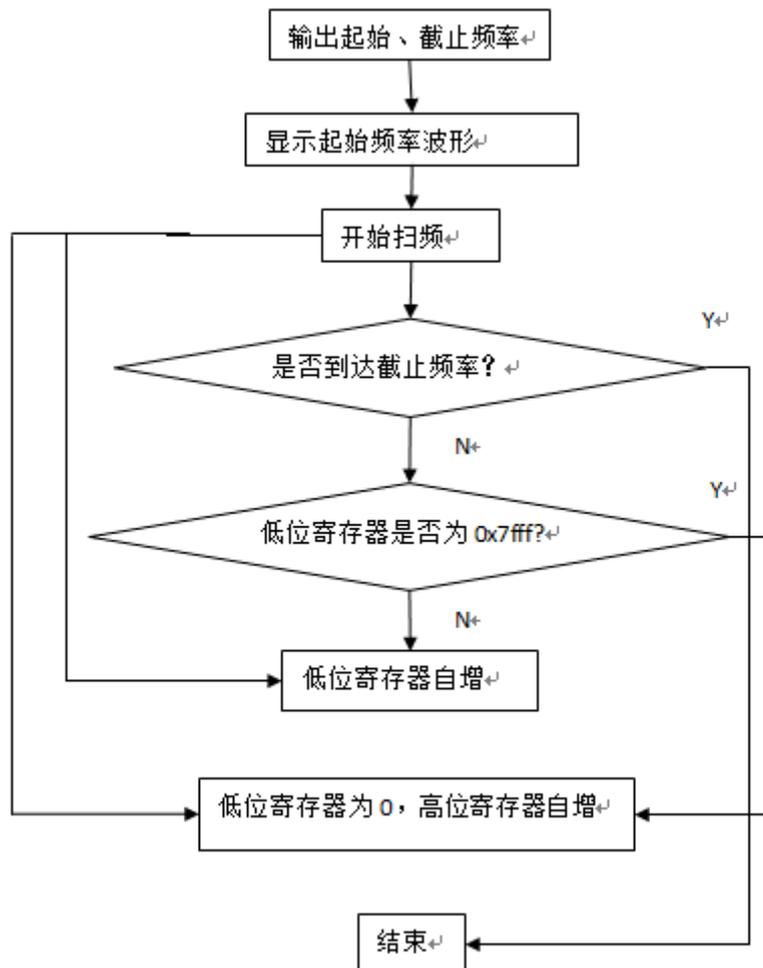
7.4 微调功能逻辑

由于硬件电路的芯片固有偏差或高频失真现象，频率、相位、幅度等设定并不能如理论值一般精确，用户如果想输出精确的频率、相位、幅度，则可以使用我们的微调功能。通过最小步长调整参数。其中，幅度的步长就是 DAC 输出的最小步长，频率的步长是当前频率值的 1%，相位的步长则是相位控制字的最小步长。进入微调界面后，通过上、下按键进行微调，每次按键则触发中断，改变相应参数的值。

7.5 扫频功能逻辑

扫频功能是使波形从低频连续的变化到高频，在示波器上可以观察到波形紧缩的过程。在本程序中，通过改变 AD9833 的频率控制字来改变输出波形的频率。由于频率范围变化很大，因此改变频率的步长也会随着频率的增大而增大，确保示波器上的视觉效果保持一致。本项目可实现正弦波从 10Hz 到 1MHz 的连续扫频功能。

扫频功能流程图如下：

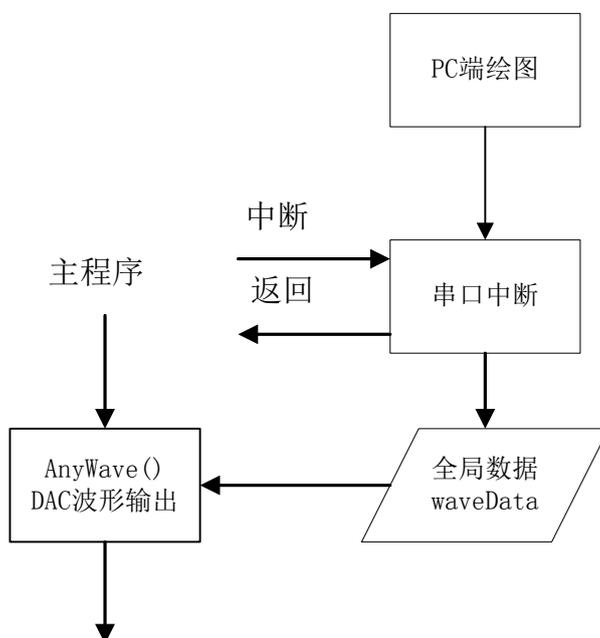


图表 13: 扫频功能流程图

7.6 任意波形发生模块软件设计

任意波形我们采用了利用串口和 PC 机通信的方案，即：在 PC 端编写软件，提供图形化的波形任意波形数据输入界面，用户通过鼠标绘制波形。该软件把绘制的波形转换为字节数据，并通过串口和 MSP430 通信，将数据传输到 MSP430 端。在 MSP430 端，需要编写相应的串口数据接收程序，实现接收来自 PC 机的波形数据功能。MSP430 端此后利用接收到的任意波形数据产生用户需要的信号。

该模块的软件设计分为两个部分：PC 端波形绘制软件和 MSP430 端波形产生程序。其中，PC 端波形绘制程序提供图形化的波形绘制功能和串口数据发送功能；MSP430 端实现串口数据的接收和任意波形的产生。二者之间通过串口通信，如下图所示：

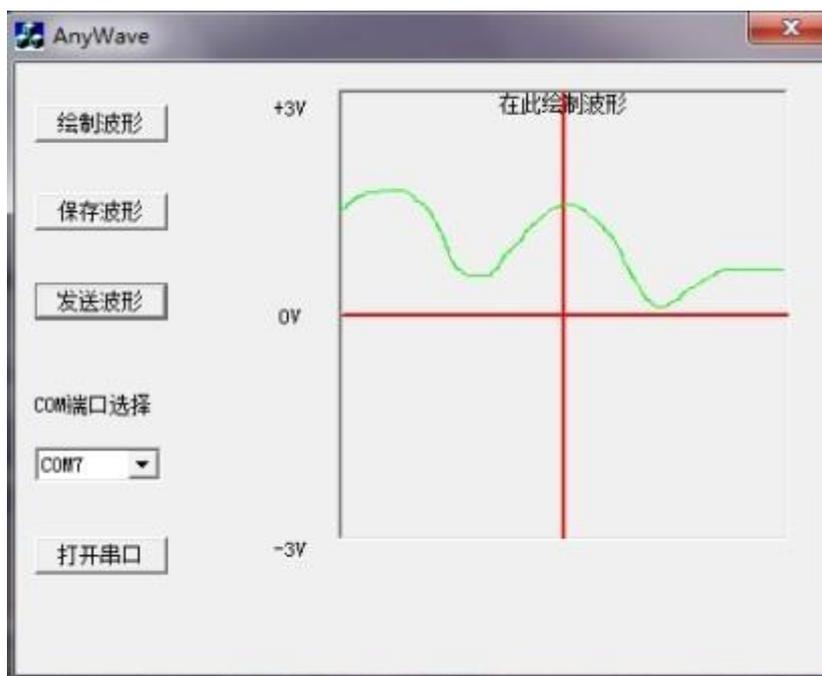


图表 14: 任意波形发生模块数据流图

7.6.1 PC 端波形绘制软件

考虑到 VC++ 对图形编程以及串口通信的支持,我们选用微软提供的 VC++ 6.0 作为开发波形绘制软件的工具。开发环境为和 VC++ 兼容的 Windows 操作系统。

VC++ 6.0 提供了许多可以直接使用的控件,通过其图形化的编程方式,可以很方便高效的设计出符合要求的应用程序界面。我们设计的波形绘制软件的用户界面如下图 7-7 所示。该程序是一个基于对话框的 Windows 应用程序。



图表 15: PC 端波形绘制软件界面

点击“COM 端口选择”选择预备发送数据的串口,点击“打开串口”可以打开已选择的串口,进入可以发送数据的状态。点击“绘制波形”可以在图中右侧的波形编辑区域使用鼠标绘制波形,点击“保存波形”可以将该波形保存为字

节数组。点击“发送波形”可以将存储的波形数据通过之前选择的串口发送出去。

具体实现上，VC++ 6.0 提供了 Windows 下的串口通信控件 MSComm，通过使用该控件，可以很方便地实现串口通信，将数据发送到 MSP430。使用时，直接添加该控件到应用程序对话框中即可使用。为下拉组合框“COM 端口选择”的关联选择端口的成员变量 `m_comboComSel`，在“打开串口”按钮的消息响应函数 `OnButtonOpenCom()` 中添加配置和打开对应串口的功能代码，即可实现指定串口的打开。其中，要注意波特率、数据位、校验位、停止位等参数的配置。

在“绘制波形”按钮的消息响应函数 `OnButtonDraw()` 中改变用户状态标志变量 `m_isDrawing`，用来标记是否正在绘图以及绘图是否成功。重写 `ON_MOUSEMOVE` 消息的消息响应函数 `OnMouseMove()` 函数，在其中添加捕获当前鼠标坐标位置的代码，即可实现实时的波形绘制以及波形数据保存功能。需要注意的是，Windows 系统下有屏幕坐标和客户区坐标两个不同的坐标系，在具体使用时可能要用到二者之间的转换。另外，这里选择了将波形数据存储为字节数组，一方面是考虑到屏幕分辨率的限制导致没有必要将波形数据存储为更精确的数据格式，另一方面是考虑到将数据存为字节数组格式能够简化串口数据的发送。

在“发送波形”按钮的消息响应函数 `OnButtonSend()` 中添加向串口发送数据的功能代码，即可实现将保存的波形数据通过串口发送到 MSP430。

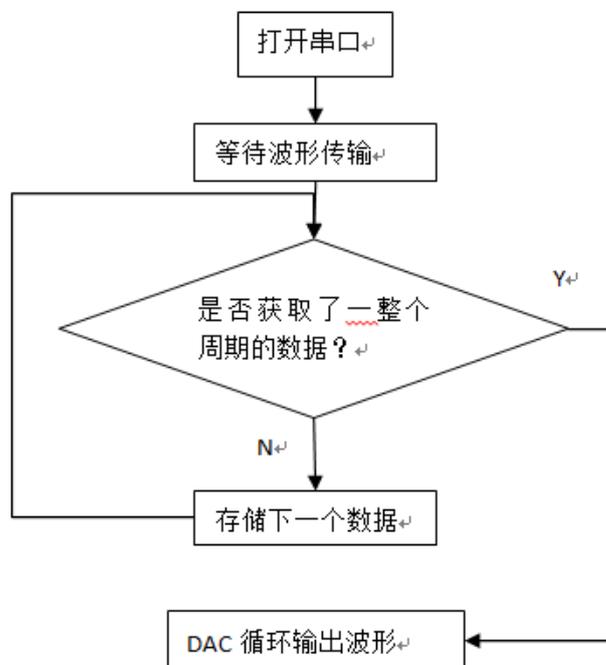
7.6.2 MSP430 端波形产生程序

在 MSP430 端，需要编写相应的串口数据接收程序，实现接收来自 PC 机的波形数据功能。MSP430 端此后利用接收到的任意波形数据产生用户需要的信号。

任意波形采用学习板的 DAC 模块输出，由于上述 VCA 控制也需要用到 DAC，因此使用两个不同的 DAC 模块，VCA 控制使用 DAC1，而任意波形使用 DAC2 进行输出。

由于任意波形需要 DAC 的持续输出，因此将 DAC 输出程序嵌入在主函数当中，设定一个 wave 数组以读取 PC 端传送过来的缓冲，并设定标志位，当进入任意波形界面后，标志位将允许主函数持续输出 DAC 波形。

任意波形流程图如下：



图表 16: 任意波形流程图

8 系统的测试与结果分析

8.1 主要仪器仪表

直流稳压源、信号发生器、PC 机

8.2 调试电路的方法和技巧

调试前要作好仪器仪表的准备工作：

- ① 根据调试内容选用合格的仪器仪表；
- ② 检查仪器仪表有无故障，量程和精度应能满足调试要求，并熟练掌握仪器仪表的正确使用；
- ③ 将仪器仪表放置整齐，经常读取信号的仪器（例如万用电表）应放置于便于观察的位置。

检查的主要方法有两种：

(1)直观检查。按照电路原理图认真检查安装的线路，看是否有接错或漏接的线，包括错线、少线和多线，特别注意检查电源、地线是否正确。信号线、元器件引脚之间有无短接，连接处有无接触不良，二极管，三极管、集成电路、电解电容等引脚有无接错。也可用手轻拉导线并观察连接处有无接触不良。一般按顺序逐一对应检查，为防遗漏，可将已查过的线在图上做出标记，同时检查元器件引脚的使用端是否与图纸相符合。

(2)借助于万用表“R*I”档或数字万用表带声响的通断测试挡进行测试。注意观察连线两端连接元器件引脚的位置是否与原理图相符合，而且尽可能直接测元器件引脚，这样可同时发现引脚与连线接触不良的故障。

另外要特别注意检查电源，包括电源供电(包括极性)、信号源连线是否正确检查直流极性是否正确，信号线连接是否正确；电源端对地是否存在短路，在通电前，断开一根电源线，用万用表检查电源端对地是否存在短路等。

8.3 调试故障、产生原因及排除方法

1.当放大电路设计为 10 倍放大电路的时候，随着频率的增加，输出波形幅值慢慢不能达到设计要求。但是单独增大放大电路倍数，容易使低频率的波形出现失真情况。

产生原因：放大电路放大倍数不足以保证要求输出幅值。

排除方法：增加双向开关，形成放大倍数可调的放大电路。低频部分可以用 10 倍放大倍数，随着频率的增高，调制放大电路的放大倍数，可以很好的解决这个问题。

2.输出波形出现削波情况

产生原因：DDS 输出波形带有直流偏置

排除方法：在其进入放大电路之前，对其进行直流滤波。即在输入端加入隔直电容。

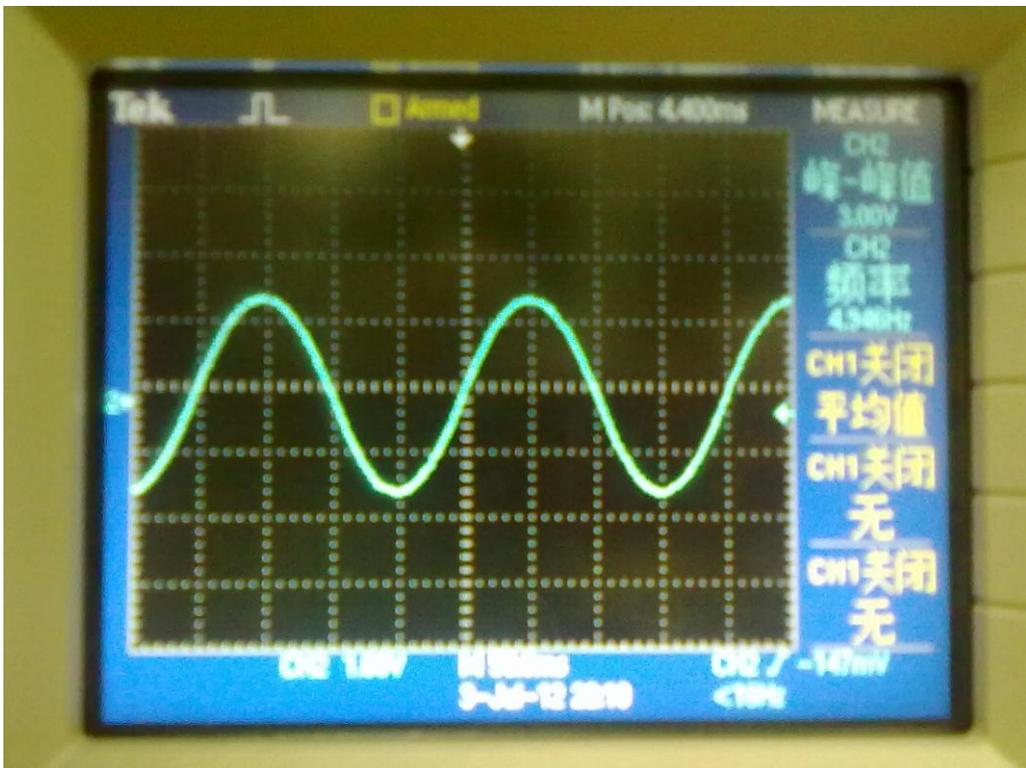
3.在电路连接正确的情况下，系统处理波形出现严重失真

产生原因：原来以为是示波器或者是电路中隔直电容造成的原因，但是最后排除这些故障后发现了电压源正负电源连接出现错误。

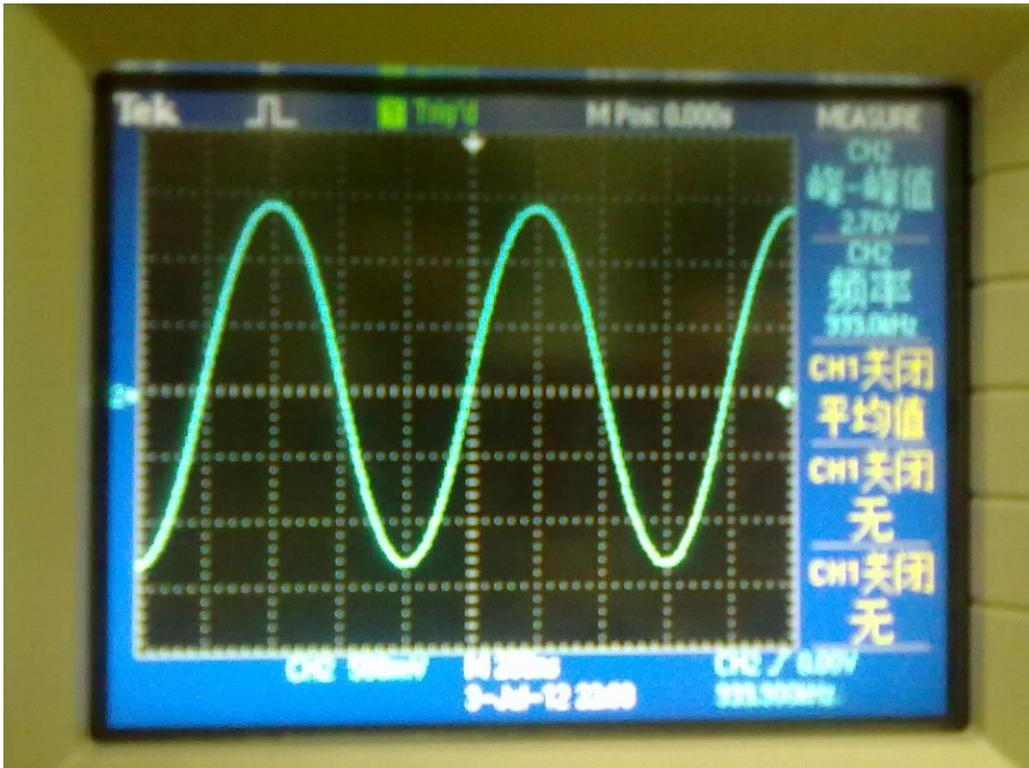
排除方法：正确的对供电电源进行了连接，得到了正确的波形。

8.4 正弦波测试及结果分析

正弦波测试结果较为理想,测试时最高频率达到 1MHz,最低频率达到 5Hz,且在极限频率时幅度基本没有衰减,略微的衰减可以通过微调来达到峰值幅度。无直流成分,波形畸变和噪声都较小。最大不失真幅度达到 3.00V,最小幅度 150mV(噪声较小)。可通过按键来预置要输出的频率和幅度,步进间隔达到 1Hz,幅度步进达到 10mV。



图表 17: 5Hz 正弦波



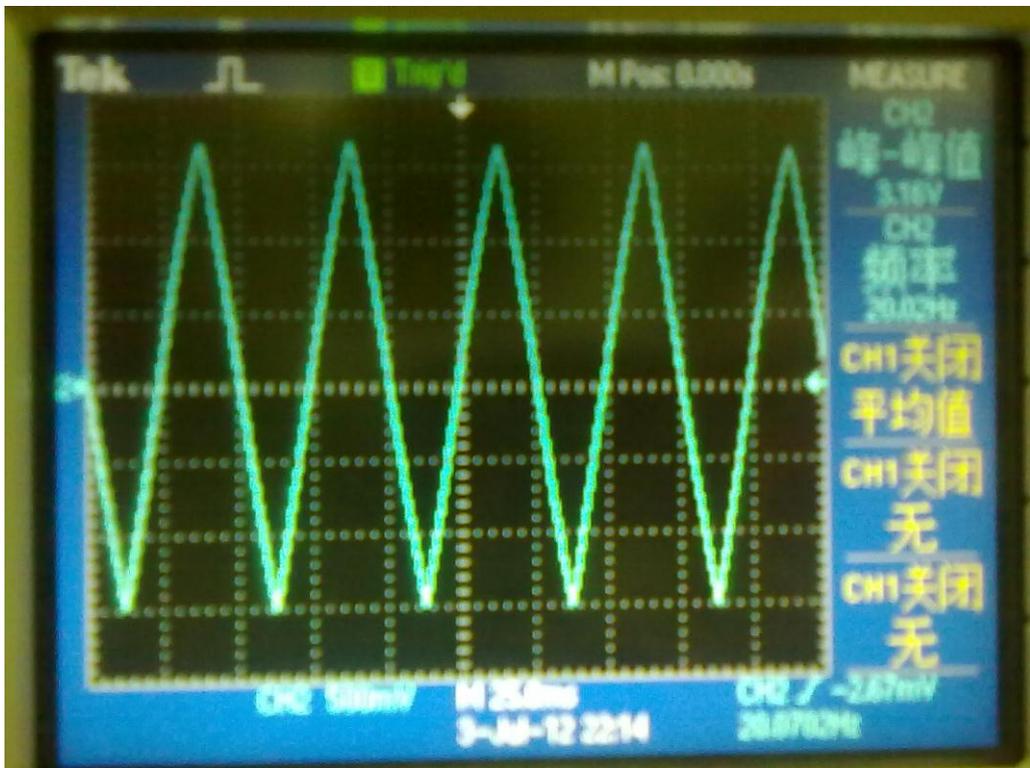
图表 18: 1MHz 正弦波

8.5 方波测试及结果分析

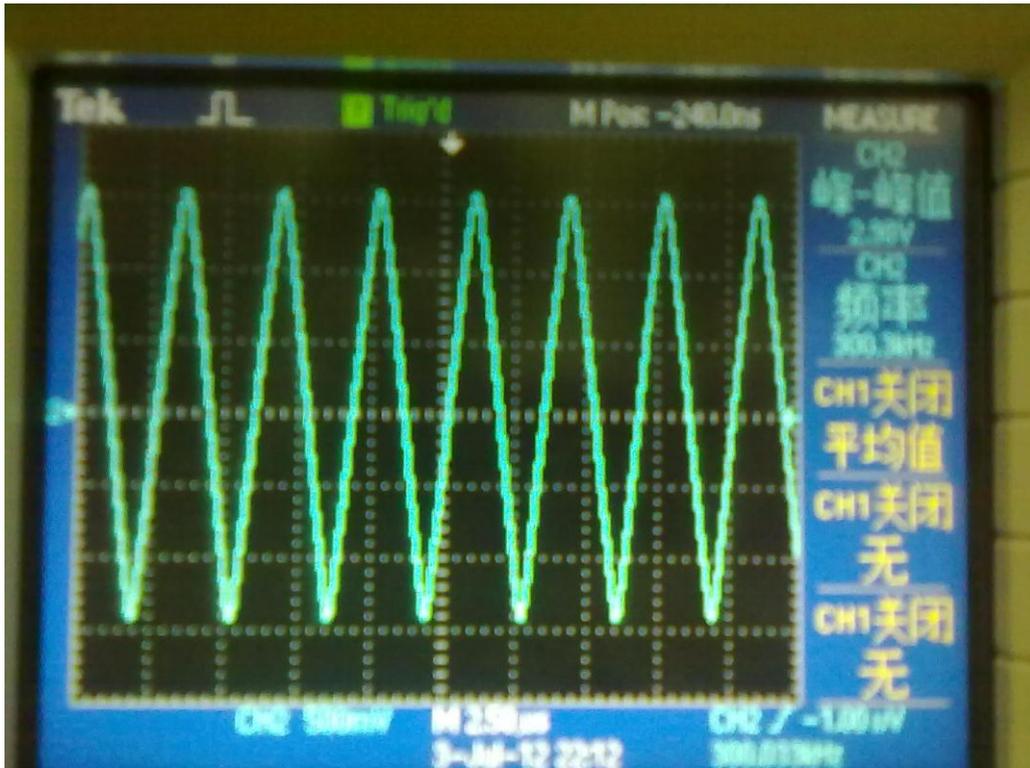
方波测试结果较为理想,测试时最高频率达到 20kHz(考虑方波的 10 次谐频可达 200kHz),最低频率达到 40Hz,且在极限频率时幅度基本没有衰减,略微的衰减可以通过微调来达到峰值幅度。无直流成分,波形畸变和噪声都较小。最大不失真幅度达到 3.00V,最小幅度 500mV(噪声较小)。可通过按键来预置要输出的频率和幅度,步进间隔达到 1Hz,幅度步进达到 10mV。

8.6 三角波测试及结果分析

三角波测试结果较为理想,测试时最高频率达到 300kHz(考虑三角波的 3 次谐波可达 900kHz),最低频率达到 20Hz,且在极限频率时幅度基本没有衰减,略微的衰减可以通过微调来达到峰值幅度。无直流成分,波形畸变和噪声都较小。最大不失真幅度达到 3.00V,最小幅度 150mV(噪声较小)。可通过按键来预置要输出的频率和幅度,步进间隔达到 1Hz,幅度步进达到 10mV。

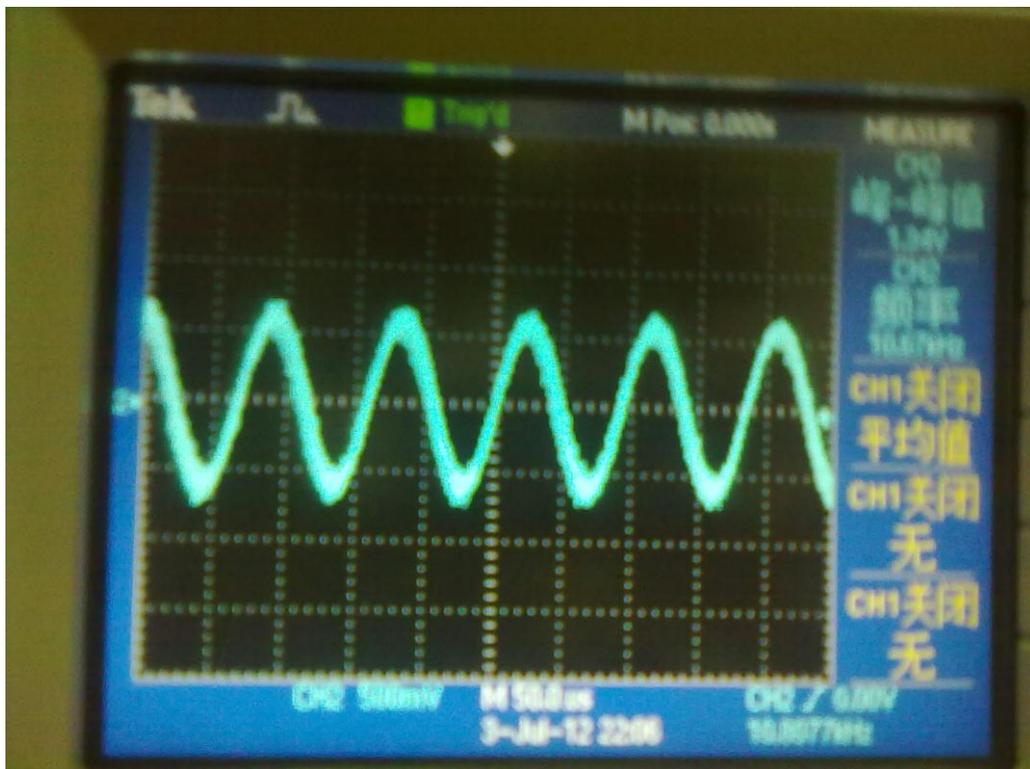


图表 21: 20Hz 三角波

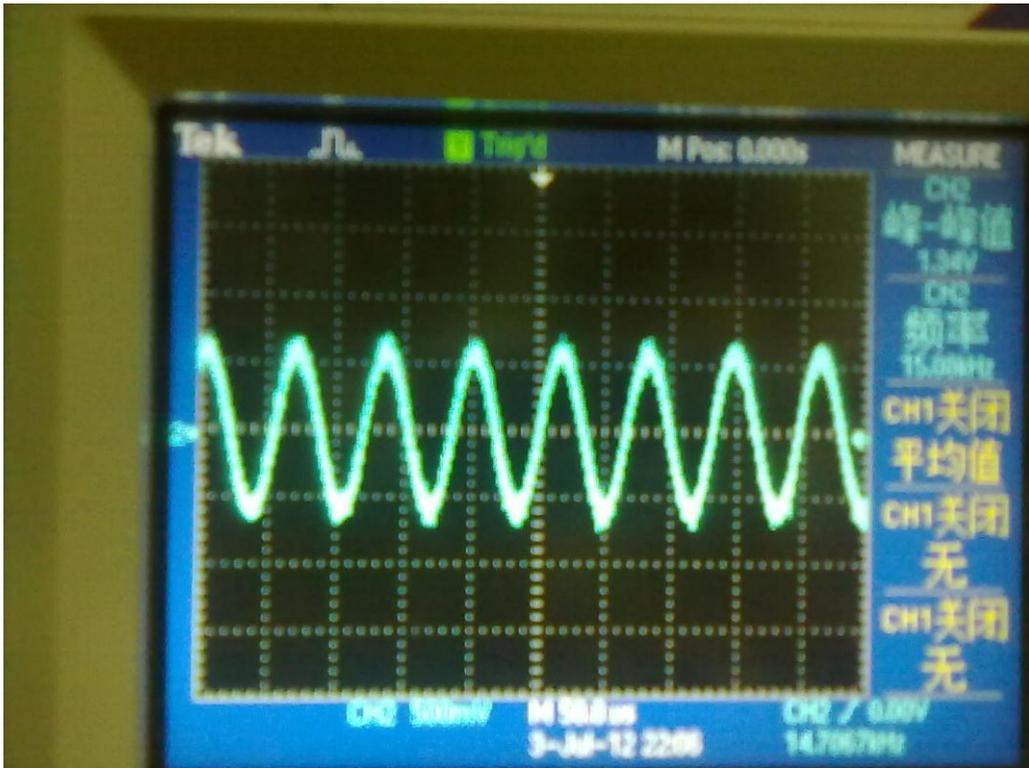


图表 22: 300KHz 三角波

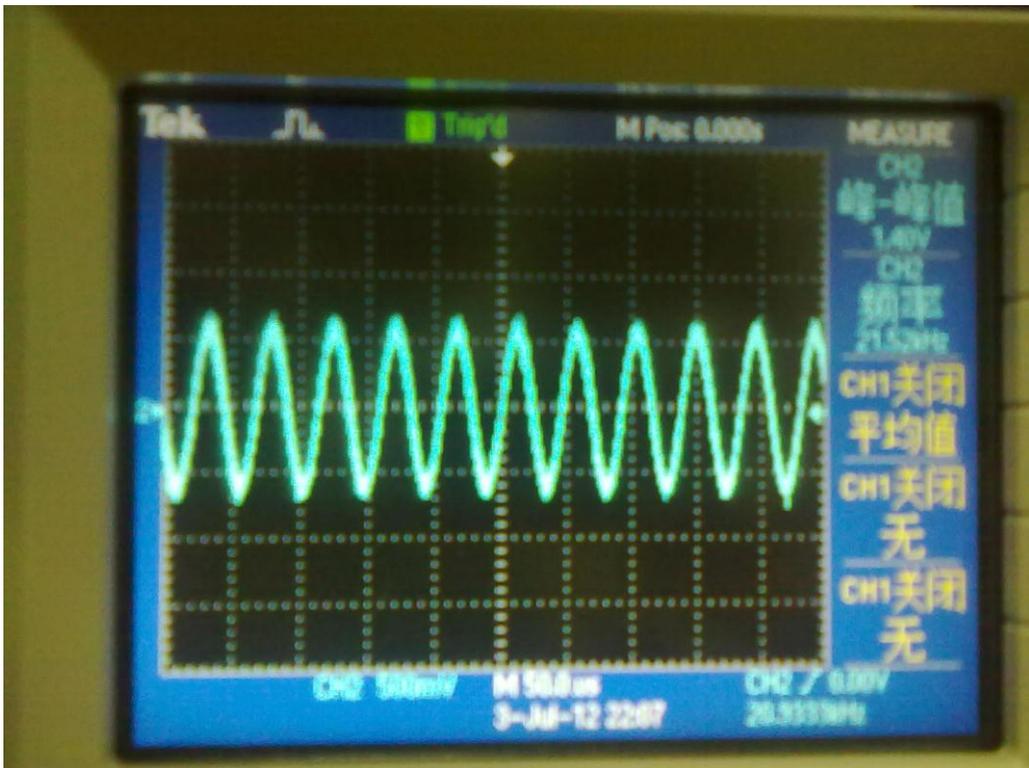
8.7 扫频功能测试及结果分析



图表 23: 扫频输出



图表 24:扫频输出(Cont.)



图表 25: 扫频输出(Cont.2)

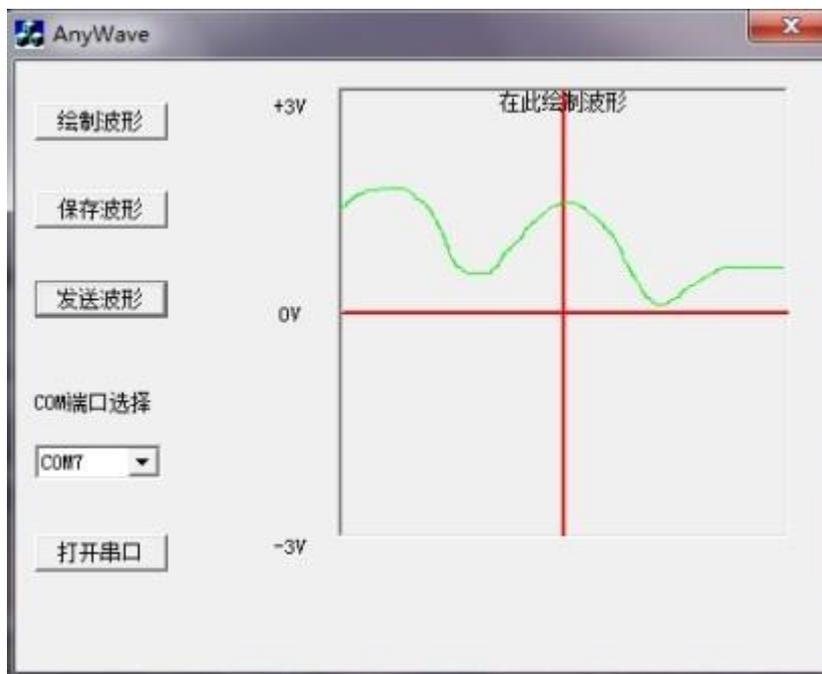
经过测试，系统可以实现从 5Hz 到 1MHz 的自动扫频功能。

8.8 任意波形测试及结果分析

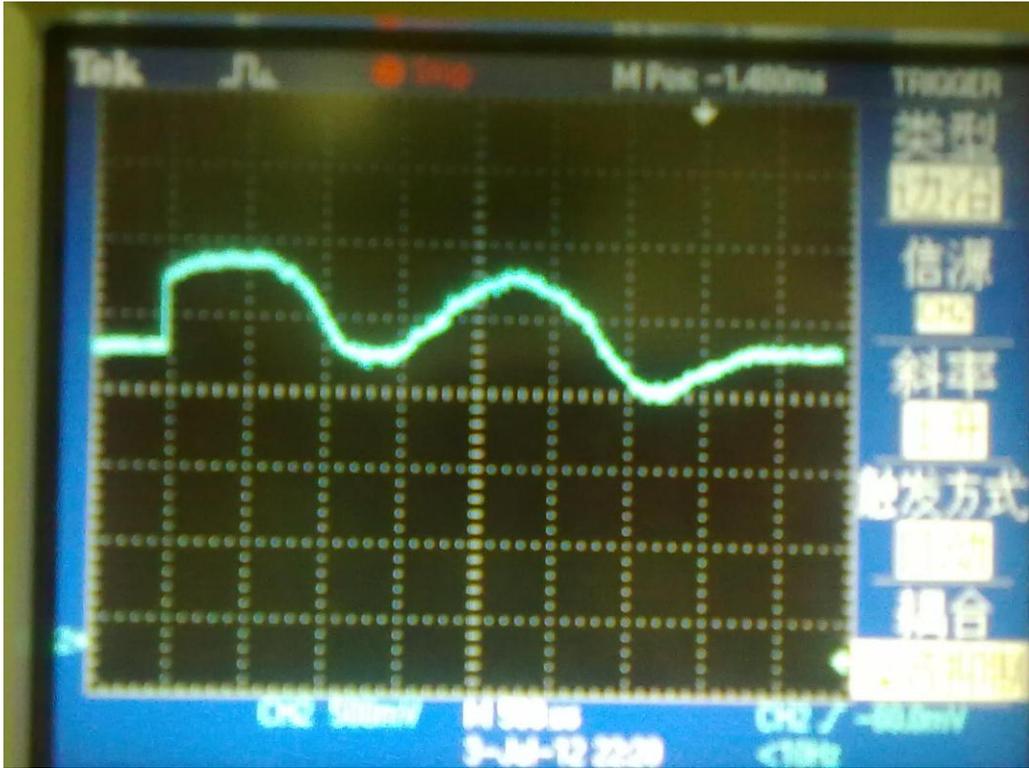
调整 MSP430 菜单到任意波形，示波器 CH2 接任意波形输出引脚。可以看到此时内置的初始化为锯齿波的波形输出。

打开使用 VC++ 6.0 编写的 AnyWave 程序（可直接点击该工程工程目录下的 Debug 文件夹中的 AnyWave.exe 可执行程序），点击下拉组合框“COM 端口选择”，选择当前 MSP430 所连接的串口 COM7，然后点击“打开串口”。点击“绘制波形”，然后用鼠标在波形编辑框中绘制波形（由于 Windows 鼠标消息响应处理的问题，画图时鼠标不要移动太快，移动要缓慢而平滑，且斜率不易太大，最好从电平 0 开始绘制）。

波形绘制完毕后，点击保存波形，然后点击“发送波形”，可以看到示波器 CH2 输出和 PC 端绘制的波形基本符合，如下面两幅图所示。

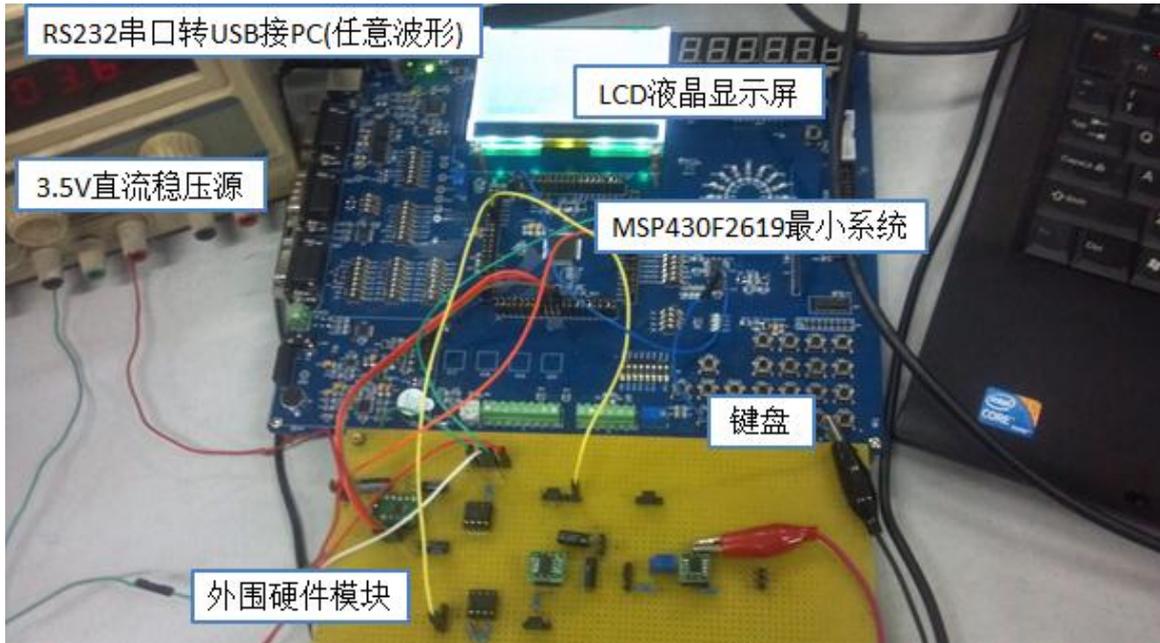


图表 26: 任意波形绘制

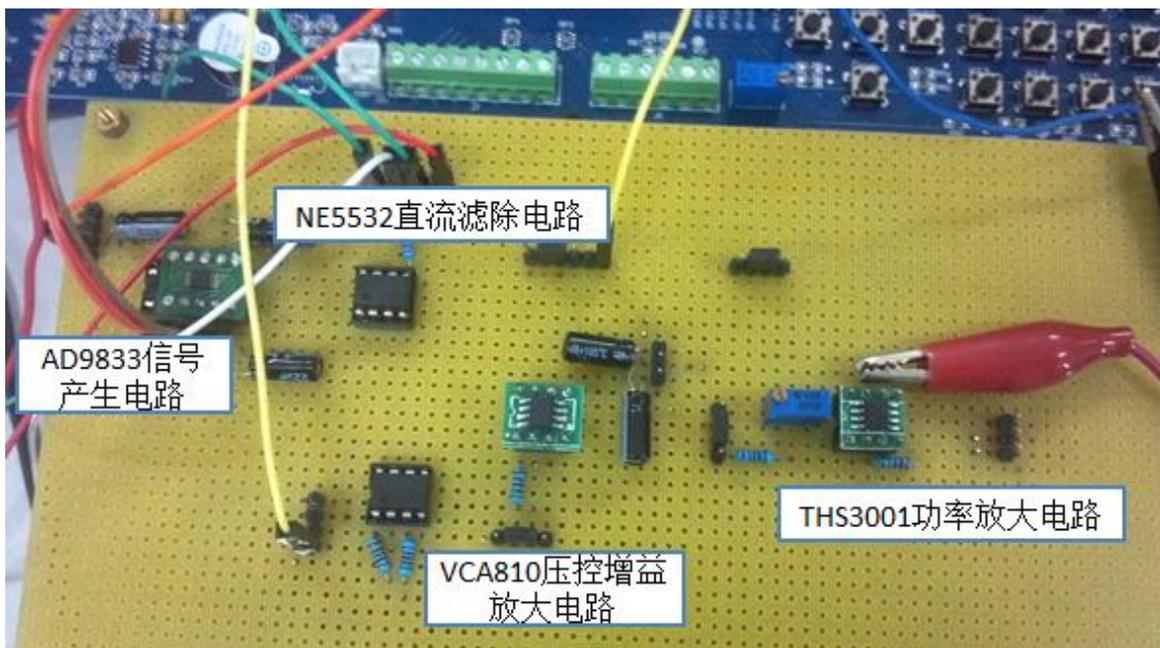


图表 27: 任意波形输出

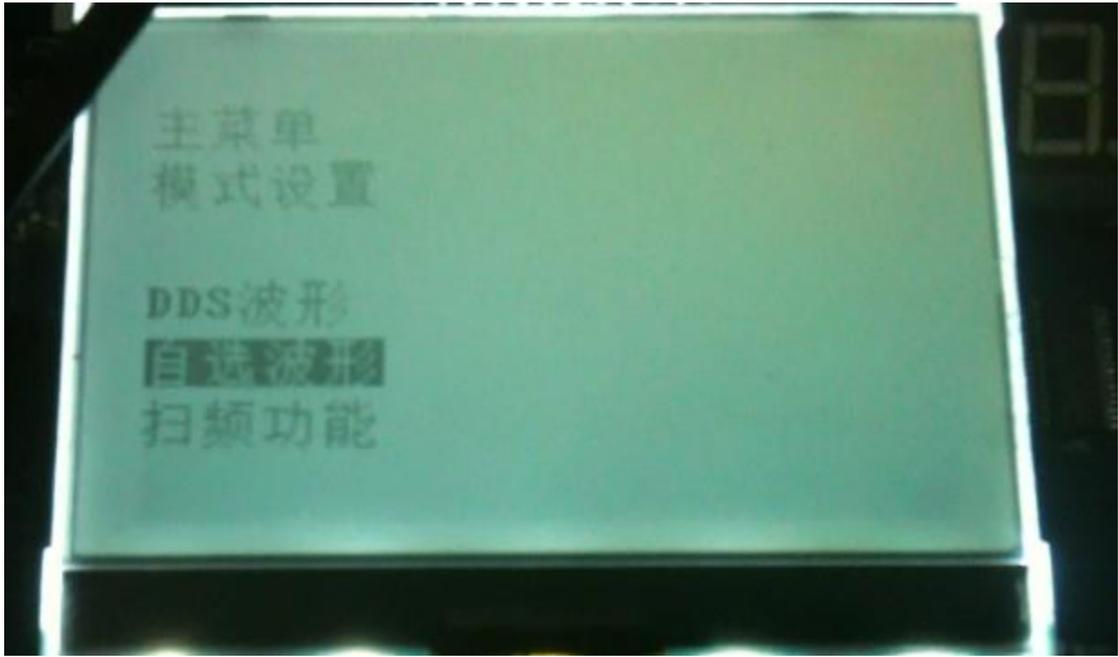
通过修改 AnyWave()函数中的送任意波形数据到 DAC12_1 的延时,可以改变任意波形的输出频率;通过在 PC 端改变送至 MSP430 的任意波形数据,可以实现幅度可调。但是,由于时间比较紧迫,尚未实现上述任意波形的频率和幅度可调。



图表 28 件电路实物图



图表 2928: 硬件电路实物图(Cont.)



图表 30：主菜单

8.9 误差定性分析

由于 DDS 的工作原理是基于数字取样和数模恢复的处理，所以输出的模拟信号中必然会有杂散噪声，其来源主要有以下五个方面：

1. 相位误差

1. 相位舍位引起的误差。在 DDS 中，由于累加器的位数 N 大于 RAM 的寻址位数 W ，使得累加器的输出寻址 RAM 时，其 $N-W$ 个低位就必须舍去，会不可避免的产生相位截断误差。该误差是 DDS 输出杂散的主要原因。假设当步进为十 Hz，去 $N=23$ ， $W=8$ ，即寻址 256 个字节，其总的信噪比为：

$$(\text{SNR})_{\text{dB}} = -10\lg \sqrt{\frac{0.44}{2^{4W}} + \frac{46.0}{2^{4N}}}$$

在本实验中所产生的误差是允许的。

2. 相位量化误差 由于波形通过一系列有限的离散采样点表示，这就不可避免的引入了相位的量化误差。增加采样点的数量可以减少这种误差。

2. 幅值量化误差

由于 RAM 中存储的数据字长和 D/A 位数有限，所以 D/A 进行幅值量化时会产生幅值量化误差。增加数据字长和 D/A 位数可以减小这种误差。若设样值点用二进制代码表示，则信号功率与量化总功率之比为：

$$R_{(S/N)} = 6.02D + 1.76\text{Db}$$

假设 $D=7$ ，则幅度量化的信噪比可达 43.9dB

3. 由与 D/A 转换器的非理想特性引起的误差

DAC 的非理想特性包括：差分、积分的非线性，D/A 转换过程中的尖峰电流，转换速率受限等。

4. 电源噪声

这种随机噪声也会对我们的波形产生一定的影响，使输出纹波增大。减少这种噪声的方法：一是选择纹波较小的电源，二是通过电源退耦以减小其影响（接去耦电容）

5. 后级运放所产生的误差

由于集成运放自身存在输入失调电压和输入失调电流的影响，以及运放本身增益带宽积与压摆率的影响，在输入频率较高的时候不可避免的有相位失真和过冲现象。

9 心得与总结

在本次 TI 杯电子设计竞赛中，通过波形发生器设计，我们不仅学到了很多新知识，更从中收获了很多感悟。

- 选择器件的时候一定要多比较几个卖家，确保芯片质量，以免由于芯片本身问题影响项目进程。
- 尽早备齐硬件芯片及工具材料，尽早熟悉芯片特性及引脚分配。
- 尽早熟悉开发板及相关模块，尽早掌握适用于开发板的编程环境。
- 焊板子之前，要按照设计好的电路图预先在面包板上调试通过。
- 尽早焊好板子并测试性能，就性能而言，焊好的板子才是最稳定可靠的。
- 在接通电路之前一定要测试电源电位，尤其是芯片接正负电源和接地的引脚电位，以免烧毁芯片，造成不必要的麻烦
- 先进行单元测试，再逐级联调，最终再进行整机测试
- 团队合作是保证项目顺利进展的关键因素，团队内部所有成员都要发挥主观能动性。
- 要不断查阅资料，无论是翻阅书籍还是在互联网上查找。
- 一切都要规范化和标准化，包括文档撰写的格式、代码规范、电路图中标号、目录结构和文件命名方式，这是保证效率的关键。
- 吉米便当常伴左右。无论做什么事情，勤奋和努力是最不可少的。

10 致谢

这次竞赛中，我们小组得到了许多人的帮助，特在此致谢。

首先，特别感谢我们的指导老师汪小燕老师。汪老师从项目一开始就特别关注项目的进度，特别通过邮件和短信等方式和我们交流，给我们的方案提出建议，比如，汪老师让我们注意 AD9833 等贴装芯片需要买转接板等等。项目进行的过程中，汪老师为我们提供了舒适的实验环境，实验室全天开放也让整个项目的进度能够快很多。

还要感谢其他组的成员，和他们的交流让我们认识到自己的不足，给自己以鞭策，激励自己不断提高。

最后，感谢电信系和 TI 公司举办并赞助这次竞赛。另外，特别要提的是 TI 公司的免费申请样片服务，这让我们增加了接近和了解 TI 芯片和 TI 公司的机会，也给我们提供了一个可以发挥我们想象力的平台。

11 参考文献

- [1] 电子线路设计·实验·测试，罗杰 谢自美，电子工业出版社，2008
- [2] 电子技术基础·模拟部分(第五版)，康华光，高等教育出版社，2006
- [3] 微机原理、汇编与接口技术(第二版)，朱定华，清华大学出版社，2005
- [4] MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用，沈建华 杨艳琴，清华大学出版社

12 附录

附件列表 (附件参见各文件夹目录)

1. 硬件设计项目文档 Proteus 电路原理图 (.DSN 格式)
2. 软件工程目录,包括 IAR 工程 WaveGenerator 和 VC++ 6.0 工程 AnyWave
3. 小组总结汇报 PPT
4. 波形发生器使用手册
5. 系统测试图片及视频资料