

“TI”杯 四川省电子设计竞赛一等奖作品

题目：波形发生器

指导教师：邹林 唐续

队员及年级：徐昺（三年级）、郑建（三年级）、敬人可（三年级）

学校及院系：电子科技大学自动化工程学院

摘要: 以模拟电路为核心, 以 MSP430 为控制系统, 设计了一个波形发生器。该波形发生器采集其输出信号的频率、幅度信息并进行反馈, 实现了对输出信号的精准控制。另外, 本波形发生器还实现了 FM、AM 功能, 人机界面由液晶屏和键盘构成, 使用方便。

本系统有效地使用了 MSP430 的片内资源, 将数字电路与模拟电路高效地融合到一起, 配合自动控制算法, 实现了题目所有要求。

关键词: 波形发生器、闭环控制、AM、FM

Waveform generator

Abstract: This waveform generator combines an analog core circuit and a digital control system based on MSP430. It forms a closed loop feedback system which can track and capture both the frequency and the voltage of its output. In addition, the waveform generator also has FM, AM function and a man-machine interface composed of LCD and keyboard.

This system uses the resource in MSP430 effectively. It combines analog circuit and digital circuit to satisfy all the requirement of the subject.

Key words: waveform generator, closed-loop control, AM, FM

硬件部分方案论证与比较

系统总体框架

本系统的基本工作原理是这样的: 系统上电后, MSP430 自动选通一路继电器, 将电容组中的一个电容接到电路中, 并通过 2 路 DA 输出 2 个默认电压值, 使恒流源开始工作 (对电容进行充放电)。此时电路开始自激, 产生出频率相同的方波、三角波、正弦波以及 TTL 信号。真有效值测量电路检测三角波的有效值, 并将该电压值送至 MSP430 的 ADC 接口, MSP430 通过调节其输出的一个 PWM 信号的占空比来控制一个直流电压信号, 该信号输入到乘法器, 对输出信号的幅度进行调整, 直至 ADC 检测到的电压值与缺省值相等为止。同时, MSP430 对输出的 TTL 信号的频率进行采样, 若采样结果与预期值不同, 则 MSP430 对两路 DA 的输出进行调整, 进而调整输出频率, 使其趋向于预期值。用户可以通过键盘输入所需的波形, 并设置其频率、幅度。系统将根据用户输入的信息自动调整输出的波形, 使其各项参数稳定在用户设置的值上。

下面, 我们对本系统几个关键功能模块的方案进行论证。

一、三角波变正弦波电路

1、使用低通滤波器将三角波变为正弦波

将三角波按傅立叶级数展开：

$$u_i(\omega t) = \frac{8}{\pi^2} U_m \left(\sin\omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \dots \right)$$

其中 U_m 是三角波的幅值，由该公式知，只要设计一个低通滤波器，使其截止频率大于三角波的基波频率且小于三角波的三次谐波频率。即可将三角波变为正弦波

2、使用折线法（逐次逼近法）将三角波变为正弦波

折线法的原理如图 1 所示，即对三角波的边进行分段，改变各个段的斜率，即可将三角波近似地“折”成正弦波。

方案选用：方案 1 的优点是输出波形较为标准，缺点是三角波的频率只能在小范围内变化，否则很难对其进行正确的滤波。方案 2 输出波形的频谱不纯净，波形质量不如方案 1，但其输出波形的质量与输入波形的频率无关，波形无明显失真。考虑到本次比赛要求输出波形的频率能在 10 Hz 至 100 kHz 间连续可调，故采用方案 2。

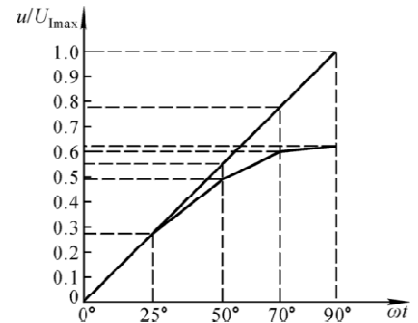


图 1 逐次逼近法原理图

二、三角波信号幅度测量、反馈电路

1、测量输出信号的峰值，并用其作为反馈信号

可以采用峰值检波电路实现对峰值的测量。电路图如图 2 所示。图中的器件需满足以下不等式：(1) $R_d + r_d < T \min$ ，(2) $R_L * C > T \max$ ，其中 C 为充电电容， R_L 为等效负载电阻， $T \min$ 和 $T \max$ 为 $u(t)$ 的最小和最大周期。用峰值检波测出的峰值存在波动，其平均值略小于实际峰值，其差量（负差值）取决与满足上述两个不等式的程度。

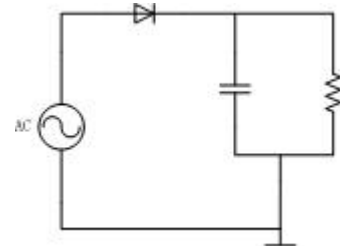


图 2 峰值检波电路原理图

2、测量输出信号的有效值，并用其作为反馈信号

可以采用 ADI 公司的专用集成芯片 AD736 来测量输出信号的真有效值，并通过示波器测量出峰值。计算出输出波形的波峰因数，并将它们存储在控制系统中。这样便可以通过测量真有效值的方法，求得峰峰值。

方案选用：此峰值检测电路应用于频率变化的波形发生器中，如采用方案 1，要达到好的效果，必须时刻满足两个不等式，需要调节电路中电阻值或电容值，不易实现且误差较大。而方案 2 采用集成芯片简单可行，检测效果好，故本项目中采用了此方案。

三、输出波形幅度调节电路

1、基于运放的放大电路

用运放搭建反相放大器，通过调节相应电阻值，即可调节放大倍数，实现输出波形的幅度调节。

2、使用模拟乘法器作为幅度调整电路

乘法器可以实现 $W=XY+Z$ 的功能，函数发生器核心电路的原始输出信号作为

X, 用控制系统输出一个直流信号作为 Y, 用 Z 作为调零输入, 即可实现输出信号的幅度调整。

方案选用: 方案 1 成本低, 可以方便的使用模拟的方式调节输出波形幅度, 方案 2 则通过调节直流信号, 通过乘法调幅, 只要系统有可以程控的直流信号便可以实现调幅。考虑到系统的闭环反馈, 从程控的实现难度上讲, 方案 2 更优, 且使用乘法器还可以实现 AM 功能 (只需将被调信号输入到 Y 即可)。故选择方案 2。

四、直流电压信号产生电路 (用于乘法器输入端, 调节幅度)

1、用集成 DAC 芯片

如 DAC0832, 实现程控电压信号, 用于幅度调节。

2、PWM 转 DA 电路

利用 MSP430 片内的 PWM 输出功能, 通过调节 PWM (设定为 100kHz) 信号占空比实现输出电压调节, 调节幅度为 0~3.3v。电路如图 3。

方案选用: 采用 PWM 转 DA 电路, 充分利用了现有系统资源, 节约了成本, 在调节幅度这种精度要求不高的场合尤为合适, 故选择方案 2。

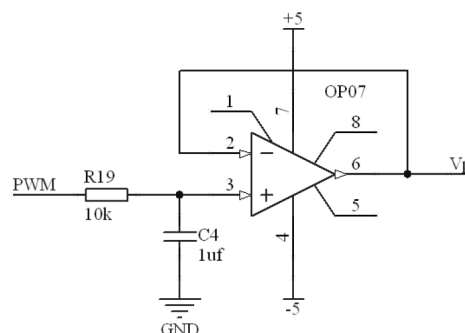


图 3 直流电压产生原理

电路设计

一、恒流源电路

恒流源可分为流出型(Current Source)和流入型(Current Sink)两种, 为了可以对电容充放电, 我们设计了这两种电路, 分别为电流输出 (图 4 左) 型和电流输入 (图 4 右) 型。

电压信号 V_{in1} 为 2.5V~5V, 在左上图中, 运放 2 脚电压等于 3 脚电压, 故电阻 R6 两端电压差 $=5V - V_{in1}$ 。发射极电流 $I_e = (5 - V_{in1}) / R6$ 。因为集电极电流 I_c 约等于 I_e , 故 $I_{out} = I_c = I_e = (5 - V_{in1}) / R6$ 。当取 $R6 = 200$ 欧姆时, V_{in} 输入 2.5V~5V 即可以产生 0~25mA 的电流。同理, 对于电流输入行恒流源, 当 $R17 = 100$ 欧姆时, 输入 -2.5V~-5V 电压, 即可以产生 0~50mA 的电流。

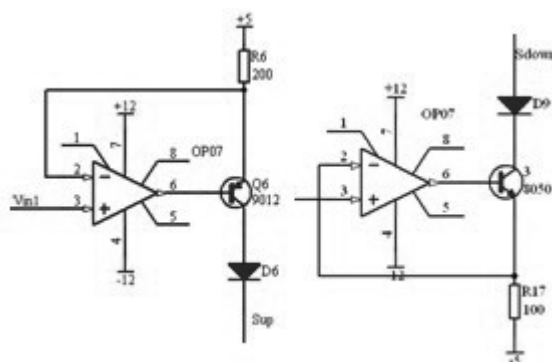


图 4 恒流源实现电路

二、真有效值检测电路

该电路使用了 AD736 芯片, AD736 是经过激光修正的单片精密真有效值 AC/DC

转换器。其主要特点是准确度高、灵敏性好（满量程为 200mVRMS）、测量速率快、频率特性好（工作频率范围可达 0~460kHz）、输入阻抗高、输出阻抗低。由于 AD736 的量程为 200mV，所以我们又设计了分压电路，将量程扩大 25 倍。AD736 的输出电压范围为 0~200mv，为了精确测量，我们将该信号放大了 10 倍，采用仪用放大器 AD620 构成放大电路。

三、比较器电路与触发器电路

比较器采用 TI 公司的 TLC372, R-S 触发器采用 CD4011 与非门搭建。电路如图 5 所示。两路比较器的输入电压与对应 R-S 触发器的输入电平的关系如表格 1 所示：

比较器输入电压 (V)	R 端输入 (0=0v, 1=5v)	S 端输入 (0=0v, 1=5v)
$-5 < V_{in} < -2.5$	0	1
$-2.5 < V_{in} < 2.5$	1	1
$2.5 < V_{in} < 5$	1	0

表 1 比较器输入输出关系表

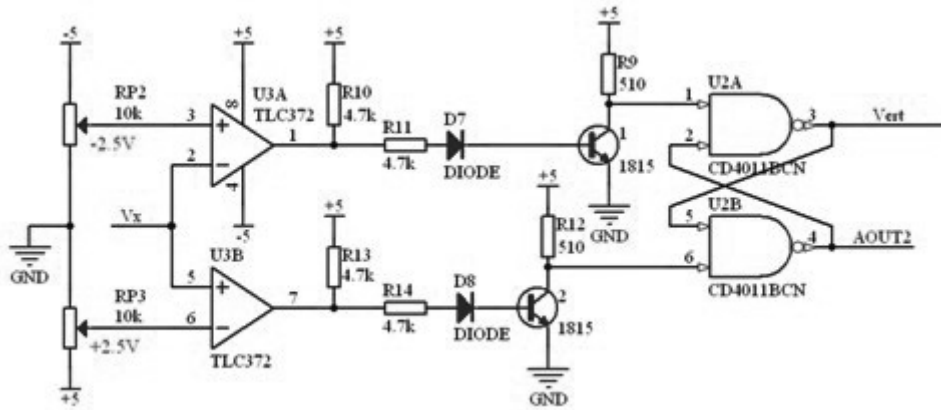


图 5 比较器实现电路

RP2和RP3分别用于-2.5v和+2.5v这两个比较点的设置。TLC372为开漏输出，R10,R13为上拉电阻，R11,R14用于限流，二极管D7,D8将负电压滤除。通过比较器和与非门间的信号调理电路，交流信号转变为直流信号，使CD4011正常工作。

四、恒流源充放电切换电路

恒流源切换电路设计的优劣会直接影响到输出波形的质量。当恒流源切换到放电回路时，若S1上的压降太大，会导致电容不能充分放电，为了解决这一问题，我们选用了MAX393作为模拟开关。MAX393是精密四路单刀单掷模拟开关，4路开关中，有2路为常开型，另2路为常闭型，实测数据显示，其导通电阻为17欧姆，当放电电流在10mA时，该电阻上的压降可忽略不计。图6中，S1选用常开型模拟开关，S2选用常闭型模拟开关。在测试过程中，我们发现，如果电路中只有S1，没有S2，在频率较高时，三角波失真严重（具

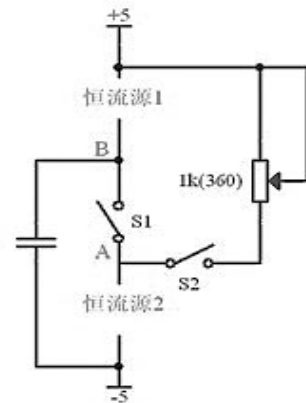


图 6 充放电电路

体波形参见系统调试测试结果)。这是因为在开关闭合前，恒流源2上端（即图6中的A点）电压大约为-4v，电容上端电压（即图6中的B点）为+1v，突然将两个点连到一起，会使电容在切换回路的瞬间，电压值迅速下降，然后再上升，最后才再正常放电。添加了S2和电位器后，可以解决这一问题。电路如右图所示，S1,S2由同一信号控制，控制信号为高电平时，S1断开，S2闭合，调节电位器电阻到360欧姆左右使得 $10\text{ma} \times 360 = 3.6\text{v}$ ，这时S2右端电压为1.5v左右，较为合适（因高频时B点在开关导通前为1.5V左右），这样在开关闭合瞬间，不会有瞬间电压骤降，三角波失真度很小。

五、三角波变正弦电路

该电路采用折线法。折线法的基本原理是利用二极管的单向导通性，使反相放大器对不同的输入电压产生不同的增益倍数。其电路图如图7所示。在反馈回路上，我们设计了10条支路以使转换结果尽可能的接近正弦波。

对该电路，我们进行了软件仿真，得到的结果如图8所示。

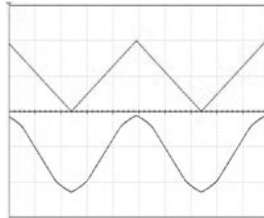


图 8 仿真结果

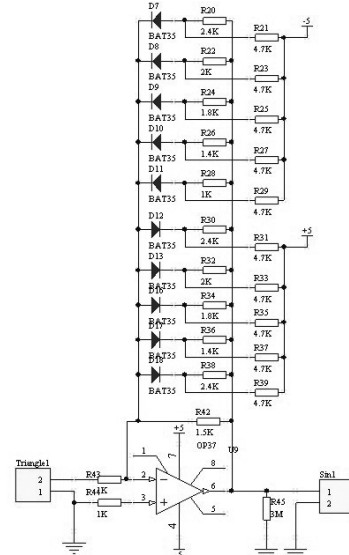


图 7 三角波变正弦原理

六、FM相关电路

由于该波形发生器的输出频率由输入电压决定，所以我们只需要将调制信号和DAC的输出电压按一定比例相加就可以实现调频。我们用80kHz信号作为载波。实验测得80KHZ时，DAC输出电压值为2.09312v，我们将DAC输出电压和外部信号分别接到一个模拟加法器的两个输入端，就实现了外部调制。另外，我们采用DDS的基本思想实现了内部调制。

系统调试测试结果

一、测量仪器

- 示波器： 泰克 TDS2012b
- 万用表： Escort 3146a
- 直流稳压电源： 大华 DH1718e_5

我们主要对波形发生器输出信号的失真度以及频率准确度进行了测试。对方波以及 TTL 信号而言，波形失真的问题基本上是不存在的。而对于三角波而言，波形失真主要表现在顶点处由于开关闭合所造成的振荡。当恒流源切换电路使用

单开关时，这一振荡现象尤为明显，具体波形如图 9 所示。而改用双开关切换电路并仔细调节切换电路中的电位器后，这一现象得到了明显的改观，具体波形如图 10 所示。至于正弦波，由于折线法的先天缺陷，我们是不可能得到频率成分单一的输出信号的。所以，我们只能尽量地使其接近标准正弦波，其波形如图 11 所示。

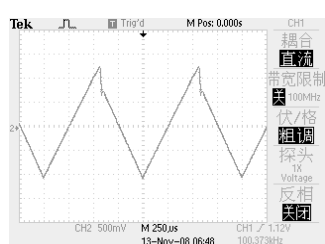


图 9 三角波失真情况

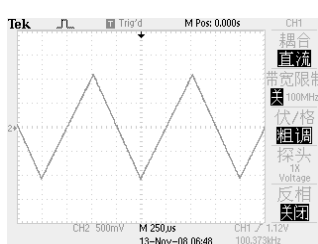


图 10 三角波改善后情况

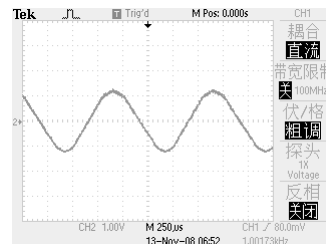


图 11 正弦波测试结果

我们还取了一些典型的频率值。对频率进行了测试，数据如表 2 所示。

设定频率	实际频率最小值	实际频率最大值
500Hz	499.9812Hz	500.0018Hz
1kHz	999.9545Hz	1.00008kHz
5kHz	4.9952kHz	5.0007kHz
10kHz	9.94565kHz	10.3475kHz
50kHz	49.2140kHz	50.6249kHz
100kHz	98.6500kHz	99.4203kHz

表 2. 频率实测值

结果分析

从测试结果来看，该波形发生器的频率准确度较高。具体而言，当频率在 1kHz 以内时，频率误差小于千分之一；当频率在 10kHz 以内时，频率误差小于千分之五；即使当频率上升到 100kHz 时，频率误差也可以控制在百分之一左右。而在波形失真方面，除正弦波外，所有的波形均无明显失真。综上所述，该系统较为圆满地实现了题目的各项要求。