2015年全国大学生电子设计竞赛

****

**数字频率计(F题）**

**【本科组】**

**摘要**

本文设计并制作了一个闸门时间为1s的数字频率计，用来测量正弦信号的频率、双路同频方波的时间间隔以及脉冲波的占空比。系统主要由信号调理电路、Cortex-M4单片机和FPGA芯片EP4CE6组成。信号调理电路由高速运放和高速电压比较器组成，并引入了宽带AGC电路，满足了题目中各项指标要求。本系统充分发挥了单片机和FPGA各自的优势，FPGA构成高速数字逻辑电路，单片机从FPGA中读取数据并进行数据处理获得测量值，并将测量值在TFT液晶屏上显示。在频率、周期、占空比等参数的测量中，采用了等精度测量原理和滑动滤波算法，使被测参数在整个频率范围内达到了很高的精度。测试表明，本数字频率计各项指标达均到了基本部分和发挥部分的要求。

**关键词：**Cortex-M4 FPGA 高速比较器 高速运放 AGC 等精度测量

**一.系统方案**

**1.1方案论证与比较**

(1)总体方案选择

方案一：使用单片机+模拟电路。单片机功能强大、价格低廉，适用于各种应用场合。尽管单片机的性能逐年提高，但对本赛题的测频要求，现有单片机速度上无法满足要求。

方案二：FPGA+模拟电路。FPGA在高速数据处理上有着独特的功能，是高速数字信号处理的最佳选择，但是在数值运算和人机接口控制方面，FPGA能力不足或性价比不高。因此，采用FPGA单独实现本频率计的数字部分并不合理。

方案三：单片机+FPGA+模拟电路。被测信号通过信号调理电路放大整形转变成数字信号送入FPGA处理，单片机从FPGA中读取数据进行计算并在TFT显示。该方案原理框图如图1所示。



图1 方案三原理框图

通过比较，本设计选用方案三。

（2）频率测量方案选择

方案一：采用测周法。选用测周法，一般将信号设为闸门信号，脉冲信号则是频率较高的标准频率信号。通过此法进行计数，令计数值为*N*，标准频率信号的周期为*T*0，频率为*f*0。则被测信号频率为： （1-1）

可以看出，该方法的测频精度会随着被测信号频率的降低而提高， 所以该法比较适合测量频率较低的信号。

方案二：采用测频法。该方法常常选用一个频率相对较低的标准频率信号作为门信号， 被测信号作为脉冲信号，在固定门时间内对其计数。设门宽度位 *T*，计数值为 *N*，那么，得到频率测量值为： （1-2）

但是直接测频法更适用于测量频率较高的信号。

方案三：利用等精度测量原理。等精度测量是在直接测频的基础上发展而来，在频率测量领域应用较为广泛。该方法的闸门时间不是固定值，而应该是被测信号周期的整数倍，总的闸门时间大于软件闸门时间，其原理如图2所示。



图2 等精度测量原理

方案四：等精度测量+测周期。等精度测量法的闸门时间必须大于被测信号的周期，但是由于题目要求测量频率的最小值为1Hz，这样计算刷新时间必然大于2s，无法满足题目要求。当测量低频信号时就可以利用测周期的方法来弥补等精度方法的不

足。

经过比较，测频方案采用方案四。

（3）时间间隔测量

方案一：电子计数法。在测量精度要求不高的前提下，电子计数法是一种非常好的时间间隔测量方法。其特点非常多:测量范围范围广，容易实现，且能够做到实时处理；但存在时标误差与原理误差，限制了其测量精度。

方案二：利用等精度测量方法。由于被测方波信号的频率范围为100Hz~1MHz，低频部分远大于1Hz，可以将两路被测信号送入FPGA，经过内部与门电路相与以后测量高电平时间，经过一定的换算，可以求出时间间隔。

经过比较，采用方案二。

**1.2方案详细介绍**

由于被测信号频率范围为1Hz~100MHz，仅使用一路通道难以完成如此宽频率范围的测量，而且在测量同频信号的时间间隔时，必须使用两路通道，故本装置设计三个通道的信号调理电路。首先是测量正弦信号的频率，在频率较高时使用通道一测量，充分利用超高带宽AGC与高速运放的特点；在频率较低时使用通道二测量，选择的运放带宽与频率相适应。当测量同频信号时，使用通道一与通道二同时采集信号，送入FPGA处理，处理后的数据由Cortex-M4计算并在TFT液晶屏上显示。详细的设计方案原理框图如图3所示。



图3 设计方案原理框图

**二.理论分析与计算**

**2.1宽带通道放大器分析**

由于赛题要求的输入信号幅值范围与频率范围都比较宽，小信号的宽带放大器设计尤为重要。题目的发挥部分要求尽量降低输入信号的幅值。这里借鉴了移动通信领域使用的AGC(自动增益控制)来完成宽带通道放大器的第一级放大。AGC原理框图如图4所示。利用其反馈机制，可以在输入幅值变化的情况下，使其输出幅值保持在一定范围内，并且具有较大的输入动态范围。AD公司的VGA芯片AD8367片内集成平方律检测器用于AGC操作，一个芯片便能完成AGC功能，而且-3dB带宽达500MHz，非常适合此场合，其输出峰峰值稳定在200mV左右。后再经TI公司的高速超低噪声电压反馈型运放OPA847放大至一定倍数，送入高速电压比较器TVL3501。由于AD8367内部自带高通滤波器，其低频响应不能符合要求。故针对100KHz以下的信号，采用运放LT1819经行放大，再经过高速比较器。使用不同通道放大信号，实现了1Hz~100MHz频率测量的要求。



图4 AGC原理图

**2.2各项被测参数测量方法的分析**

对于正弦波频率的测量，由于其发挥部分的频率范围为1Hz~100MHz，范围非常宽，因此，采用单个信号调理电路难度非常大，所以在低频段和高频段的信号得用不同的信号调理电路，参考图2所示的原理框图。对于时间间隔测量，则是利用FPGA将两路信号经行内部相与后测量，可以采用内插法来提高测量时间精度，其原理如图5和6所示。对于脉冲信号占空比的测量，可以先测量信号的频率，然后再捕捉信号的上升沿和下降沿，计算时间，比较一下就能得出脉冲的宽度。



图5 被测方波信号时间间隔的测量

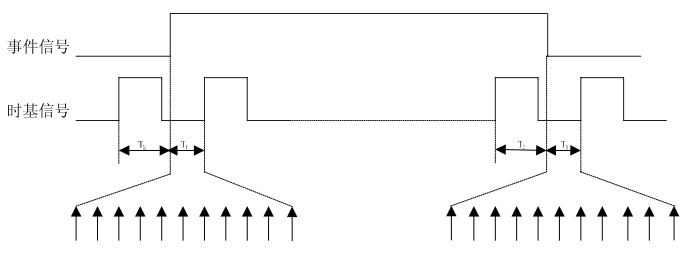


图6 时间内插原理示意图

**2.3提高仪器灵敏度的措施**

可以通过以下措施提高灵敏度:

（1）硬件电路措施。在高频电路板中，合理地布线可以使抗干扰性能更好保持信号完整性。例如在走线时应按照45°脚拐弯，或者走圆弧线，这样可以减小高频信号的发射和相互之间的耦合；电源端的去耦电容，电容安放的位置靠近其芯片的电源端；信号线不能走环路，需要按照菊花链方式布线；在各个连接端口都使用射频BNC接头，信号发生器与仪器之间使用SMA转接线，做好屏蔽工作。采用低噪声放大器作为前置处理，提高系统的信噪比。

（2）软件措施。将单片机接收到的数据存入循环缓冲区，进行滑动平均滤波。在FPGA中使用锁相环提高系统时钟，降低绝对误差。提高FPGA内部参考时钟频率和计数器位数来提高灵敏度。这种方法将提高硬件复杂度，但由于采用FPGA实现，因此并不提高成本。

**三.电路与程序设计**

**3.1 AGC电路设计**

使用AD8367的优势在于其自身完整的AGC解决方案，片内自带平方律检波器，DETO检波输出直接接增益控制引脚GAIN，增益控制方向引脚MODE接低电平，及放大倍数随增益电平的增大而减小，构成负反馈回路。由于是高频电路，阻抗的匹配尤为重要，AD8367的输入阻抗为200Ω，为了匹配信号发生器50Ω，信号输入端使用了电阻网络匹配电路，后级输出同样接匹配电阻。参考AD8367数据手册上面评估版的电路图设计，AGC电路原理图如图7所示。



图7 AGC电路原理图

**3.2放大比较电路设计**

通道一的放大器选用TI公司的高速超低噪声电压反馈型运放OPA847，直接构成放大倍数约52倍的同相放大电路。输入端接51Ω电阻到地构成输入阻抗约为50Ω的系统，与AD8367输出匹配。电源端加上瓷片电容与电解电容用于对电源的去耦。

通道二的原理图如图8所示。放大器选用Linear Technology公司的双通道运算放大器LT1819。为了提高放大电路带宽，采用两级级联的放大电路，每级放大器的增益均设为4倍，总增益为16倍，在第二级放大处加入直流偏置，使放大器输出直流偏置为1.5V。电压比较器采用TI公司的4.5ns轨至轨高速电压比较器TLV3501。为了使电路的抗噪声能力强一些，设计成滞回比较器。由电路理论可以得出滞回比较器的阈值电压VT+与VT-分别为以下两个式子：

(3-1)

(3-2)

当放大电路输入正弦信号的有效值为10mV(提高部分要求的最低输入电压)时，放大电路输出信号的峰峰值为450mV，加上1.5V的直流偏置，信号的最大值为1.7V，最小值为1.3V。将电压比较器的*V*T+设为1.6V，*V*T-设为1.4V。取*R*6=2kΩ，*R*7=820Ω，通过电阻分压得到*V*REF=1.45V。根据上式可以计算得到*R*9=20kΩ， *R*8=1kΩ。

图8 通道2电路原理图

**3.3FPGA内部电路设计**

FPGA是本系统的核心，其内部原理框图如图9所示。FPGA通过并行总线与单片机通信。系统通过不同的功能模块实现参数的测量，各功能模块采用Verilog语言设计。与单片机通信时使用数据缓冲器，保证数据持续稳定。同时运行多个测量模块，充分发挥FPGA的高速并行特性。



图9 FPGA设计原理图

**3.4程序设计**

单片机的程序包括主程序和中断服务程序，其程序流程图如图10所示。主程序的主要的功能是，根据从FPGA获取数据计算相应参数。再经过滑动平均滤波算法处理数据，稳定输出显示，提高测量精度。使用Protothread的阻塞机制，降低程序设计复杂度。异步显示提高显示刷新速度。



图10 程序流程图

**四.测试方案与结果分析**

**4.1主要测试使用仪器**

多路直流稳压电源：MPS-3005L-3

200M数字存储示波器：TDS1012B-SC

100M函数信号发生器：SP1461

泰克数字万用表：DMM4050

**4.2测试数据及结果分析**

1.正弦信号不同有效值下的频率测量

赛题的测量要求是正弦信号的有效值范围为10mV~1V，频率范围为1Hz~100MHz。表1为其测量数据表。

表1 正弦信号频率测量结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 输入频率 | Hz | | | kHz | | | MHz | | |
| 1 | 100 | 500 | 1 | 100 | 500 | 1 | 50 | 100 |
| 有效值(mV) | 测量频率（Hz） | | | 测量频率（kHz） | | | 测量频率（MHz） | | |
| 10 | 0.9950 | 99.98 | 499.96 | 1.0001 | 100.03 | 499.93 | 1.0010 | 50.00 | 100.00 |
| 50 | 0.9998 | 100.02 | 500.12 | 1.0010 | 99.96 | 500.00 | 1.0002 | 50.00 | 100.00 |
| 100 | 1.0003 | 100.00 | 500.03 | 1.0023 | 99.80 | 500.13 | 0.9967 | 50.00 | 100.00 |
| 500 | 0.9999 | 100.01 | 500.20 | 0.9989 | 100.01 | 500.05 | 1.0003 | 49.99 | 100.00 |
| 1000 | 1.0001 | 100.00 | 500.00 | 0.9996 | 99.98 | 499.79 | 1.0006 | 50.00 | 100.00 |

由测量结果可以看出，只有部分几个频率测量的相对误差大于10-4，其余都满足要求

2.不同幅度、不同频率下时间间隔测量

赛题的时间间隔测量要求信号的频率范围为100Hz~1MHz，峰峰值电压范围为50mV~1V。表2为其测量数据。

表2 方波时间间隔测量

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 给定时间间隔 | ms | | | us | | | | | | | |
| 1 | | 5 | 0.1 | | 1 | | 100 | | 500 | |
| 信号频率/Hz | 100 | 500 | 100 | 1K | 1M | 1K | 500K | 100 | 2K | 100 | 1K |
| 峰峰值(mV) | 时间间隔（ms） | | | 时间间隔（us） | | | | | | | |
| 50 | 1.01 | 1.03 | 5.02 | 0.101 | 0.103 | 1.03 | 1.01 | 101 | 98 | 505 | 497 |
| 500 | 0.98 | 0.97 | 5.05 | 0.100 | 0.098 | 1.01 | 0.99 | 99 | 102 | 503 | 501 |
| 1000 | 1.02 | 1.02 | 4.95 | 0.098 | 0.101 | 0.98 | 1.00 | 97 | 101 | 493 | 505 |

由测量结果可以看出，时间间隔测量相对误差有部分满足要求。

3.不同幅度、不同频率下脉冲信号占空比测量

赛题要求脉冲信号占空比测量信号为矩形波，频率范围为1Hz~5MHz，峰峰值电压范围为50mV~1V，占空比范围为10%~90%。表3为其测量数据。

表3 脉冲波占空比测量

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 给定脉冲宽度 | 10% | | | | | 50% | | | | | 90% | | | | |
| 信号频率/Hz | 1 | 100K | 1M | 5M | | | 1 | 100K | 1M | 5M | | 1 | 100K | 1M | 5M |
| 峰峰值(mV) | 测量占空比/% | | | | | | 测量占空比/% | | | | | 测量占空比/% | | | |
| 50 | 10.01 | 10.02 | 9.91 | | 10.00 | | 50.01 | 50.00 | 49.88 | 49.98 | | 90.10 | 89.67 | 90.12 | 90.88 |
| 200 | 10.03 | 9.97 | 10.03 | | 10.03 | | 49.89 | 50.02 | 50.00 | 50.02 | | 89.89 | 90.11 | 90.24 | 90.35 |
| 1000 | 9.99 | 10.00 | 10.04 | | 9.99 | | 50.02 | 49.99 | 50.08 | 50.01 | | 90.04 | 90.23 | 89.79. | 90.13 |

由测量结果可以看出，大部分测量数据达到题目的要求。

**五、总结**

本系统外围电路简单明了，不同性能的测量通道保证了其能够测量宽频率范围的信号。以高速处理器件FPGA为核心，辅以单片机作为显示控制器，本系统除个别指标有所偏差外，均达到赛题指标要求。

**六、参考文献**

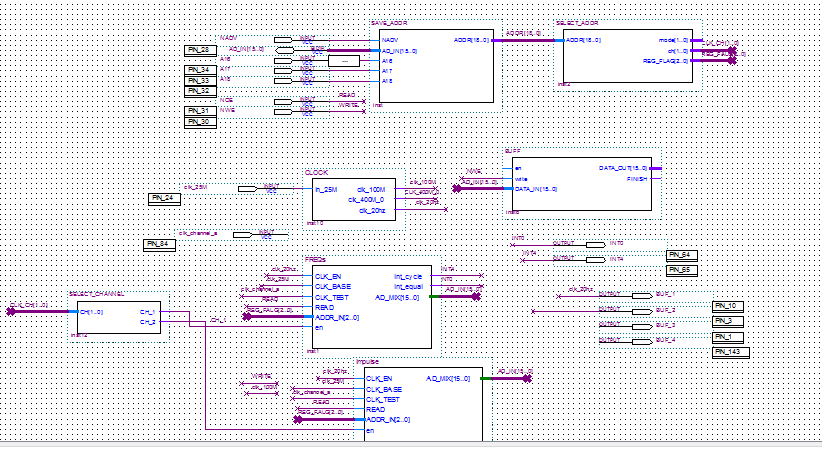
[1]张永瑞，宣宗强.电子测量技术[M].北京：高等教育出版社，2011.

[2]路秋生.数字信号处理的FPGA实现（第3版）[J]. 核工业自动化 2002.

**附录一 总体电路原理图**

****

**附录二 FPGA顶层原理图**

****

**附录三 部分单片机程序**

int main(void){

/\* SysTick end of count event each 10ms \*/

LCD\_Init();

EXTI\_init();

RCC\_GetClocksFreq(&RCC\_Clocks);

SysTick\_Config(RCC\_Clocks.SYSCLK\_Frequency / 100);

Freq\_Init\_ALL();

Impluse\_Init\_ALL();

PT\_INIT(&PT\_t,100,FREQ\_GET\_SERVICE);

PT\_ADD\_THREAD(&PT\_t);

FPGA\_EXIT\_INIT();

u16 i;

//频率显示

NumBar\_CPP numBar\_freq(11,8,(float)100000,(float)0);

numBar\_freq.setLtag(String\_L(0,0,0,2,WHITE));

numBar\_freq.setRtag(String\_L(0,0,"Hz",WHITE));

numBar\_freq.show();

numBar\_freq.setFunc(Freq\_Value\_UnitFix);

//周期显示

NumBar\_CPP numBar\_tim(11,7,(float)100000,(float)0);

numBar\_tim.setLtag(String\_L(3,0,2,2,WHITE));

numBar\_tim.setRtag(String\_L(3,0,"ms",WHITE));

numBar\_tim.show();

numBar\_tim.setFunc(Tim\_Value\_UnitFix);

//占空比显示

NumBar\_CPP numBar\_impluse(11,6,(float)9999,(float)0);

numBar\_impluse.setLtag(String\_L(3,0,4,3,WHITE));

numBar\_impluse.setRtag(String\_L(3,0,"%",WHITE));

numBar\_impluse.show();

//时间间隔显示

NumBar\_CPP numBar\_span(15,5,(float)100000,(float)0);

numBar\_span.setLtag(String\_L(3,0,7,4,WHITE));

numBar\_span.setRtag(String\_L(3,0,"ms",WHITE));

numBar\_span.show();

//numBar\_tim.setFunc(Tim\_Value\_UnitFix);

while(1){

PT\_SERVICE();

}

}