

**2015 年全国大学生电子设计竞赛**

**全国一等奖作品**

**设计报告 部分错误未修正，软件部分未添加**

**竞赛选题：数字频率计（F 题）**

**摘 要**

本设计选用 FPGA 作为数据处理与系统控制的核心，制作了一款超高精度 的数字频率计，其优点在于采用了自动增益控制电路（AGC）和等精度测量法， 全部电路使用 PCB 制版，进一步减小误差。

AGC 电路可将不同频率、不同幅度的待测信号，放大至基本相同的幅度， 且高于后级滞回比较器的窗口电压，有效解决了待测信号输入电压变化大、频率 范围广的问题。频率等参数的测量采用闸门时间为 1s 的等精度测量法。闸门时 间与待测信号同步，避免了对被测信号计数所产生±1 个字的误差，有效提高了

系统精度。

经过实测，本设计达到了赛题基本部分和发挥部分的全部指标，并在部分指 标上远超赛题发挥部分要求。

关键词：FPGA 自动增益控制 等精度测量法

# 目录

[摘 要 1](#_bookmark0)

[目录 2](#_bookmark1)

[1. 系统方案 3](#_bookmark2)

[1.1. 方案比较与选择 3](#_bookmark3)

[1.1.1. 宽带通道放大器 3](#_bookmark4)

[1.1.2. 正弦波整形电路 3](#_bookmark5)

[1.1.3. 主控电路 3](#_bookmark6)

[1.1.4. 参数测量方案 4](#_bookmark7)

[1.2. 方案描述 4](#_bookmark8)

[2. 电路设计 4](#_bookmark9)

[2.1. 宽带通道放大器分析 4](#_bookmark10)

[2.2. 正弦波整形电路 5](#_bookmark11)

[3. 软件设计 6](#_bookmark12)

[4. 测试方案与测试结果 6](#_bookmark13)

[4.1. 测试仪器 6](#_bookmark14)

[4.2. 测试方案及数据 7](#_bookmark15)

[4.2.1. 频率测试 7](#_bookmark16)

[4.2.2. 时间间隔测量 7](#_bookmark17)

[4.2.3. 占空比测量 8](#_bookmark18)

[4.3. 测试结论 9](#_bookmark19)

[参考文献 9](#_bookmark20)

# 1. 系统方案

## 1.1. 方案比较与选择

### 1.1.1. 宽带通道放大器

方案一：OPA690 固定增益直接放大。由于待测信号频率范围广，电压范围 大，所以选用宽带运算放大器 OPA690，5V 双电源供电，对所有待测信号进行较 大倍数的固定增益。对于输入的正弦波信号，经过 OPA690 的固定增益，小信号 得到放大，大信号削顶失真，所以均可达到后级滞回比较器电路的窗口电压。

方案二：基于 VCA810 的自动增益控制（AGC）。AGC 电路实时调整高带宽 压控运算放大器 VCA810 的增益控制电压，通过负反馈使得放大后的信号幅度 基本保持恒定。

尽管方案一中的 OPA690 是高速放大器，但是单级增益仅能满足本题基本部 分的要求，而在放大高频段的小信号时，增益带宽积的限制使得该方案无法达到 发挥部分在频率和幅度上的要求。

方案二中采用 VCA810 与 OPA690 级联放大，并通过外围负反馈电路实现自 动增益控制。该方案不仅能够实现稳定可调的输出电压，而且可以解决高频小信 号单级放大时的带宽问题。因此，采用基于 VCA810 的自动增益控制方案。

### 1.1.2. 正弦波整形电路

方案一：采用分立器件搭建整形电路。由于分立器件电路存在着结构复杂、 设计难度大等诸多缺点，因此不采用该方案。

方案二：采用集成比较器运放。常用的电压比较器运放 LM339 的响应时间 为 1300ns，远远无法达到发挥部分 100MHz 的频率要求。因此，采用响应时间为 4.5ns 的高速比较器运放 TLV3501。

### 1.1.3. 主控电路

方案一：采用诸如 MSP430、STM32 等传统单片机作为主控芯片。单片机在 现实中与 FPGA 连接，建立并口通信，完成命令与数据的传输。

方案二：在 FPGA 内部利用逻辑单元搭建片内单片机 Avalon，在片内将单 片机和测量参数的数字电路系统连接，不连接外部接线。

在硬件电路上，用 FPGA 片内单片机，除了输入和输出显示等少数电路外， 其它大部分电路都可以集成在一片 FPGA 芯片中，大大降低了电路的复杂程度、 减小了体积、电路工作也更加可靠和稳定，速度也大为提高。且在数据传输上方 便、简单，因此主控电路的选择采用方案二。

### 1.1.4. 参数测量方案

频率等参数的测量采用闸门时间为 1s 的等精度测量法。闸门时间与待测信 号同步，相比于传统方案，避免了对被测信号计数所产生±1 个字的误差，有效 提高了系统精度。测量频率时，在闸门时间内同时对待测信号和标准信号（时钟 信号）计数，标准信号计数值除以待测信号计数值乘上时钟周期即为待测周期； 测量两个信号的时间间隔时，通过异或门将时间间隔转化为周期脉冲信号，通过 对脉冲信号等精度测量得到间隔时间。~~测量频率时计算闸门时间内的上升沿脉冲 除以闸门时间~~；~~测量两个信号的相位差时，则计算第一个信号~~

## 1.2. 方案描述

系统总体框图如图 1 所示，待测信号首先进入自动增益电路，其输出电压增 益到一个大于后级滞回比较器窗口电压的固定值，经过比较器电路后，输出给 FPGA 进行相关参数的测量，并最终显示在屏幕上。在 FPGA 内部，数字电路系 统与片内单片机通信，基于闸门时间为 1s 的等精度测量算法，测算相关参数。



**FPGA**

**比较器电路**

**AGC电路**

**宽带放大**

**输入信号**

**NIOS**

**II**

**TFT显示**

**蓝牙模块**

**放大信号 信号整形 参数测量 结果输出**

图 1 系统总体框图

# 2. 电路设计

## 2.1. 宽带通道放大器分析

本设计的宽带通道放大器如图 2 所示，是一个自动增益控制模块。 压控放大器 VCA810 依靠反馈得到的控制电压控制放大倍数；高速比较器

AD8561 比较的是 VCA810 输出信号和预设电压，使用二极管和 RC 对比较器的 输出信号进行检波；TL082 将检波得到的电压转换至 VCA810 的控制电压范围 内，使得 VCA810 能够正常工作；OPA690 起着二级放大与级联缓冲的作用。具 体电路连接如图 3 所示。

**VCA810**

**压控放大器**

**VCA810**

**压控放大器**

**AD8561**

**高速比较器**

**检波电路**

**OPA690**

**高速放大器**

**控制电压**

**调整电路**

**输入信号**

**输出信号**

**反馈部分**

图 2 自动增益模块流程图



图 3 自动增益模块原理图

## 2.2. 正弦波整形电路

正弦波形醒后经过 AGC 电路后，进入如图 4 所示的滞回比较器，整成方波。 该电路的窗口电压为 96mV



图 4 滞回比较器

# 3. 软件设计

测量频率

FPGA通信

开始

功能选择

测量时间间隔

测量占空比

输出结果

图 5 软件流程图

# 4. 测试方案与测试结果

## 4.1. 测试仪器

表 1 测试仪器

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 名称、型号、规格 | 数量 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | RIGOL DG4102 100M 信号发生器 | 1 |
| 2 | RIGOL DS2202A 200M 数字示波器 | 1 |
| 3 | RIGOL DP832 可编程直流电源 | 1 |
| 4 | FLUKE 18B 万用电表 | 1 |

## 4.2. 测试方案及数据

### 4.2.1. 频率测试

（1）测试方法：选取 1Hz、100Hz、1KHz、1MHz、10MHz5 个频率点，测 量分别测量输入信号在 3mVrms、10mVrms、50mVrms、100mVrms、1Vrms 的结 果，并计算误差

（2）测量结果

表 2 频率测量数据表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 幅度 | 10mVrms | | 50mVrms | | 100mVrms | | 1Vrms | |
| 频率 | 测量值/Hz | 误差 | 测量值  /Hz | 误差 | 测量值/Hz | 误差 | 测量值/Hz | 误差 |
| 1 | 0.999169 | 8.31E-04 | 0.999988 | 1.19E-  05 | 0.999885 | 1.15E-04 | 0.999992 | 8.00E-  06 |
| 100 | 99.998248 | 1.75E-05 | 100 | 1.75E-  05 | 100.0003 | 2.65E-06 | 100.00036 | 3.60E-  06 |
| 1k | 1000 | 0.00E+00 | 1000.003 | 3.00E-  06 | 1000.003 | 3.00E-06 | 1000.047 | 4.70E-  05 |
| 100k | 1000003 | 3.00E-06 | 1000003 | 3.00E-  06 | 1000003 | 3.00E-06 | 1000003 | 3.00E-  04 |
| 10M | 10000035 | 3.50E-06 | 10000037 | 3.70E-  06 | 10000039 | 3.90E-06 | 10000039 | 3.90E-  04 |
| 100M | 100000368 | 3.68E-06 | 10000037 | 3.68E-  06 | 100000000 | 0.00E+00 | 100000390 | 3.90E-  04 |

### 4.2.2. 时间间隔测量

（1）测试方法：选取 0.1us、1ms、100ms 个频率点，测量分别测量输入信 号在 100Hz、200Hz、500Hz、1000Hz 四种时间间隔以及 20mV、50mV、以 及 1V 时的结果，并计算误差

(2)测量结果

表 3 方波 Vpp=20mV 时间间隔测量数据表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **时间间隔** | **0.1us** | | **1ms** | | **100ms** | |
| **频率** | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 |
| **100** | 0.0978 | 0.022 | 0.998 | 0.002 | 99.9988 | 1E-05 |
| **200** | 0.1002 | 0.002 | 1.0001 | 1E-04 | 100.001  1 | 1E-05 |
| **500** | 0.0998 | 0.002 | 1.032 | 0.032 | 100.002  1 | 2E-05 |
| **1000** | 0.0996 | 0.004 | 1.0001 | 1E-04 | 100.002  1 | 2E-05 |

表 4 方波 Vpp=50mV 时间间隔测量数据表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **时间间隔** | **0.1us** | | **1ms** | | **100ms** | |
| **频率** | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 |
| **100** | 0.0998 | 0.002 | 0.997 | 0.003 | 99.9998 | 2E-06 |
| **200** | 0.1001 | 0.001 | 1.0002 | 2E-04 | 100.0010 | 1E-05 |
| **500** | 0.0998 | 0.002 | 1.003 | 0.003 | 100.002 | 2E-05 |
| **1000** | 0.0999 | 0.001 | 1.000 | 0 | 100.002 | 2E-05 |

表 5 方波 Vpp=1V 时间间隔测量数据表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **时间间隔** | **0.1us** | | **1ms** | | **100ms** | |
| **频率** | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 | 测量 | 误差 |
| **100** | 0.0999 | 0.001 | 0.9998 | 2E-04 | 99.9998 | 2E-06 |
| **200** | 0.1 | 0 | 1.0001 | 1E-04 | 100.002 | 2E-05 |
| **500** | 0.1001 | 0.001 | 1.0003 | 3E-04 | 100.0021 | 2E-05 |
| **1000** | 0.0999 | 0.001 | 1.0010 | 1E-03 | 100.0023 | 2E-05 |

### 4.2.3. 占空比测量

（1）测试方法：选取 10%、30%、50%、70%、90%四个相位测，分别测量 输入信号是 1Hz、100Hz、10KHz、1MHz、5MHz 的结果，并计算误差

（2）测量结果

表 4 占空比测量数据表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设  定 占 空 比 | 10% | | 30% | | 50% | | 70% | | 90% | |
| 频 率 | 测量 值  /% | 误差  /% | 测量 值  /% | 误差  /% | 测量 值  /% | 误差  /% | 测量 值  /% | 误差  /% | 测量 值  /% | 误差  /% |
| 1Hz | 10.00  41 | 0.04  1 | 29.99  877 | 0.004  1 | 50 | 0 | 69.99  95 | 0.000  714 | 89.9  987 | 0.001  444 |
| 100  Hz | 9.995  1 | 0.04  9 | 29.99  87 | 0.004  333 | 50 | 0 | 69.99  5 | 0.007  143 | 89.9  987 | 0.001  444 |
| 10K  Hz | 9.996  3 | 0.03  7 | 30.00  01 | 0.000  32 | 49.99  998 | 4E-  05 | 69.99  437 | 0.008  043 | 90.0  004 | 0.000  444 |
| 1MH  z | 9.996  274 | 0.03  726 | 29.97  34 | 0.088  667 | 49.98  902 | 0.02  196 | 70.00  331 | 0.004  731 | 89.9  987 | 0.001  444 |
| 5MH  z | 10.00  41 | 0.04  1 | 30.02  6 | 0.086  667 | 50.08  29 | 0.16  58 | 70.23  478 | 0.335  404 | 90.0  235 | 0.026  111 |

## 4.3. 其他发挥部分（亮点）

1、频率测量时，在 1Hz-100MHz 时，最低测量有效值 Vrms 可降低为 5mV；

2、方波测量占空比和时间间隔时，最低测量的 Vpp 可达到 10mV；

3、频率、时间间隔测量时分辨率超过发挥部分要求；

4、除使用键盘进行人机交互外，增加了蓝牙通讯功能，可实现无线控制功能， 切换仪器测量模式。

**4.4.** **测试结论**

实测表明，本设计在频率测量、相位测量、占空比测量等多个参数上全都可 以达到赛题基本部分和发挥部分的要求，并在部分指标上远超发挥部分要求。

**参考文献**

[1]张永瑞. 电子测量技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2009. [2]夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2013. [3]刘凯, 顾新.VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设[M] 西安:西安电子科技大

学出版社,2009.

[4]冈村迪夫. OP 放大电路设计:从重视再现性设计的基础到实际应用[M]. 北京:科学出版社, 2004.

[5]Sergio, Franco. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 西安:西安交通大学出版

社, 2004.