

# 集成运放参数测试仪 (B 题) 设计报告

参赛学校:

学院:

作者:

# 集成运放参数测试仪（B 题）

**摘要：**本设计采用 AT89C55WD 单片机和可编程逻辑器件（FPGA）作为其测试和控制核心，能够测试通用运放的基本参数并实现自动量程转换等功能。运放测试电路参照了任务书中所给电路，用单片机控制继电器进行切换，可编程逻辑器件 FPGA 控制 A/D 采样，单片机实现顶层的控制，使整个系统能够协调工作，以完成题目要求。另外，本设计也对发挥部分进行了一定的设计，完成了增益带宽测试和自动循环测试功能。设计中采用了模块化设计方法，提高了设计和调试效率。

**关键词：**集成运放，可编程器件（FPGA），单片机（AT89C55WD），继电器

## 1. 系统方案选择和论证

### 1.1 系统基本方案

根据题目要求，系统可以划分为控制模块、测试模块和信号源模块。模块框图如图 1.1.1 所示。为实现各模块的功能，分别做了几种不同的设计方案并进行了论证。

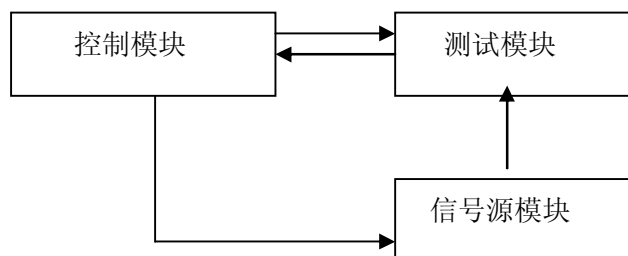


图 1.1.1 测试仪的基本模块方框图

#### 1.1.1 各模块方案选择和论证

##### (1) 控制器模块

根据题目要求，控制器主要用于控制测试电路的切换、控制 A/D 转换模块、信号源的控制和对显示模块的控制。对于控制器的选择有以下三种方案。

方案一：采用 FPGA(现场可编程门阵列)作为系统的控制核心。FPGA 可以实现复杂的逻辑功能，规模大，密度高，它将所有器件集成在一块芯片上，减小了体积，提高了稳定性，并且可应用 EDA 软件仿真、调试，易于进行功能扩展。FPGA 采用并行的输入输出

方式，提高了系统的处理速度，适合作为大规模实时系统的控制核心。由测试模块输出的信号并行输入 *FPGA*，*FPGA* 通过程序设计控制 *A/D* 转换，并进行输出，但由于本设计对数据处理的速度要求不高，*FPGA* 的高速处理的优势不能得到充分的体现，并且由于其集成度高，硬件量大、设计复杂且难度大，可能会影响完成任务的进度。

方案二：采用单片机 (*AT89C51*) 作为系统的控制核心。单片机算术运算功能强，软件编程灵活，可用软件编程实现各种算法的和逻辑控制，但由于设计中要求复杂的逻辑控制，单片机的硬件设计简单，这就会大大加强软件编程的工作量，可能会导致程序的混乱，且单片机的硬件简单，其口线不足，就可能导致设计不能成功。

方案三：采用单片机 (*AT89C55*) 和复杂可编程逻辑器件 (*FPGA*) 共同作为系统的控制核心。单片机实现顶层控制和数据处理，*FPGA* 实现底层控制。在单片机的管理下，由复杂可编程逻辑器件 *FPGA* 完成具体的操作，例如对信号的采样和存储，信号源的控制；而单片机实现对 *FPGA* 及整个测试仪的管理，例如选择所要测试的运放参数；数据处理；键盘选择显示参数，等等。这样可以结合两者的优点，使两者有机的结合起来。减少每个部分的工作量。基于以上分析，因此本设计采用方案三。初步拟定控制器的组成如图 1.1.2 虚线框内所示。

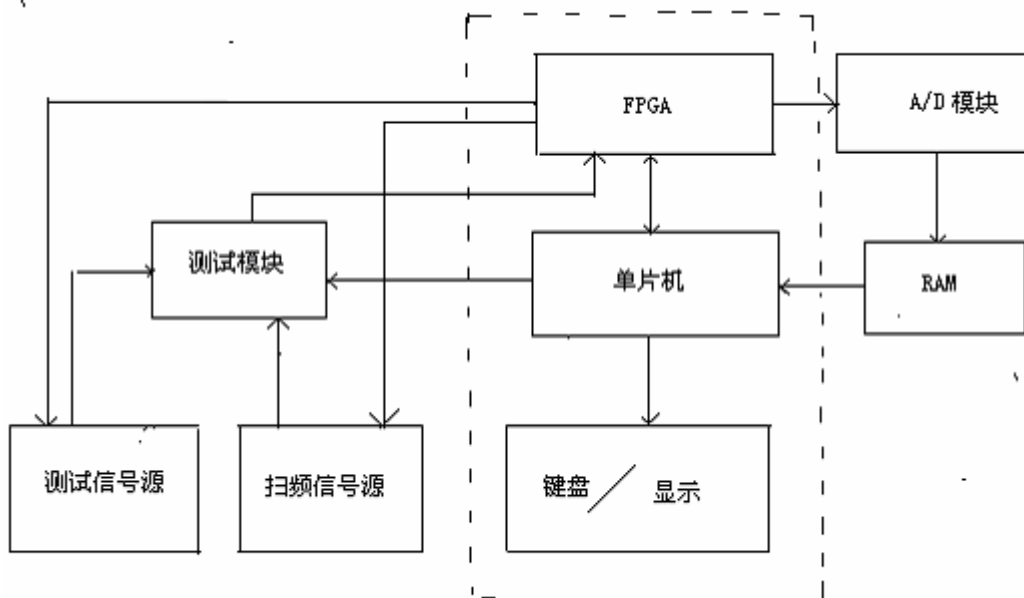


图 1.1.2 控制器框图

## (2) 参数测试模块

本模块主要用于运放参数的测量，输出的是模拟量。所要测试参数的电路具有一定的共同点，所以可考虑用开关进行切换，以达到不同的功能。

因此，在设计过程中主要考虑的是能否有效的切换到各参数测量电路中，对于开关的选择有以下三种方案。

方案一：用拨号开关来实现电路的切换。拨号开关是完全的用人工进行控制。由于本模块中采用了较多的切换器件，在电路中容易产生混乱，而且如果要做到完全统一调度也是非常困难的，由于是手动控制，效率是非常低的。

方案二：用模拟开关来实现电路的切换。模拟开关可以由单片机来控制其通和断，但是，模拟开关在进行切换的时候，会有一些分布参数，例如模拟开关的内阻和分布电容等参数，又因为信号的幅度很小，如果这些参数比较大，就会严重影响到信号。

方案三：用继电器来实现电路的切换。继电器可以用集成芯片 SN75451 来驱动继电器以实现电路的通断。12V 直流驱动的继电器的触发电阻 $\leq 50\text{m}\Omega$  能够满足小幅度信号的要求。

基于继电器的以上优点，本模块中采用方案三作为开关，以实现电路的不同功能。

### (3) 信号调理模块

模拟信号输出是一低频信号，且存在有一定的干扰，特别是 50Hz 交流电及其高次谐波的影响较大，所以要采用具有最大平坦响应的巴特沃斯二阶 RC 有源低通滤波器来进行信号的条理。

当测  $BW_G$  时，扫频信号的频率范围是 40kHz~4MHz，这就会有低频信号的干扰，所以要滤除其低频干扰。所以采用了巴特沃斯二阶 RC 有源高通滤波器。

在测试不同的参数时，要选择不同的滤波器，可采用继电器进行切换，以实现不同参数的测试。

### (4) 信号源模块

#### ① 测试信号源产生模块

在进行  $A_{VD}$ 、 $K_{CMR}$  测试的时候，需要接输出频率为 5Hz、输出电压有效值为 4V 的正弦波信号，这就要求设计此模块，有以下三种方案。

方案一：用晶体振荡电路产生符合要求的正弦波信号。晶体可以产生非常稳定的正弦波信号，但是，要求的是输出频率为 5Hz、输出电压有效值为 4V，对于低频而言，晶体是很难做到这么精确的指标。

方案二：用 555 定时器产生符合要求的正弦波信号。因为测试信号源的精度要求很高，而 555 定时器的电阻和电容的取值将影响到输出脉冲的宽度  $t_w$ ，随着  $t_w$  的宽度

的增加，它的精度和稳定度也将下降。由于是要求输出频率为 5Hz， $t_w$  的宽度将会很大，这就会严重影响到精度和稳定度。

方案三：用 FPGA 和 D/A 转换器产生符合要求的正弦波信号。频率精度很高，而且稳定度也很高。由于要求的频率很低，所以一般的 D/A 转换器就可胜任。符合任务中的要求。所以，基于以上分析，拟定方案三。框图如图 1.1.3 所示。

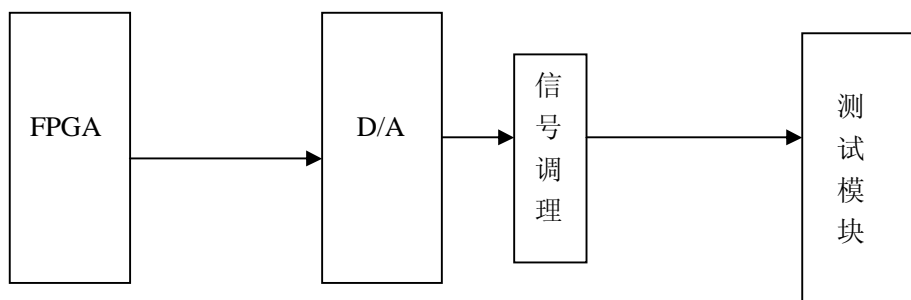


图 1.1.3 测试信号源产生框图

#### ② 扫频信号源模块

由于任务要求制作一信号源，且输出频率范围为 40kHz~4MHz，误差小于 1%，电压有效值为  $2V \pm 0.2V$  有以下两种方案可供选择：

方案一：用专门的 DDS 芯片做符合要求的扫频源。由于芯片的成本很高，而且市场供应不足。所以不采用此方案。

方案二：用 FPGA 做符合要求的信号源。FPGA 的逻辑功能强大，集成度高，减小了体积，提高了稳定度。使用 VHDL 语言，设计灵活，且自由度大，可应用 MaxPlus II 软件仿真、调试、易于功能扩展。基于以上优点，本模块采用方案二。

#### (5) 显示模块

显示器是人机接口输出的一部分，良好的人机接口将会使输出内容能够更加的丰富。我们考虑以下两种方案。

方案一：采用 LED(发光二极管)作为显示部分。LED 有 8 段和米字型两种用于显示各种数字。但是，LED 显示的形式比较单一，功能简单，而且比较耗电。人机交换比较困难。

方案二：采用 LCD（液晶显示器）作为显示部分。LCD 具有以下优点：① 轻薄短小、② 低耗电量、③ 无辐射危险、④ 平面直角显示、⑤ 影像稳定不闪烁、⑥ 可视面积大、⑦ 画面效果好、⑧ 分辨率高。LCD 有显示图形、字符和数字等功能，且 LCD

的人机界面友好。在本设计中要能显示数码、字符以及汉字，只有点阵式显示器才能够胜任。所以，基于以上方案，本模块采用 LCD 作为显示器。

### 1.1.2 系统各模块的最终方案

经过仔细的分析和论证，决定了系统个模块的最终方案如下：

- (1) 控制模块：采用单片机(AT89C55)和复杂可编程逻辑器件(FPGA)共同控制；
- (2) 集成运放参数测试模块：采用继电器切换的测试电路；
- (3) 信号调理模块：采用二阶 RC 有源滤波器；
- (4) 测试信号源产生模块：采用 FPGA 和 D/A 转换器产生正弦波信号；
- (5) 扫频信号源模块：采用 FPGA 产生方波扫频信号；
- (6) A/D 转换模块：采用 AD1674 作为转换器；
- (7)显示模块：采用 LCD(液晶显示器)。

系统的基本框图如图 1.1.4 所示。单片机主要用于顶层控制和运算处理电路，而 FPGA 实现底层控制，实现某部分具体电路的功能，两部分可以进行有机的结合，以实现其任务书所给要求。其工作过程如下：

系统通电后，用单片机控制测试电路进行模式选择，实现各种参数的测试，模拟量经信号调理后，单片机发出信号以实现 FPGA 对 A/D 的采样，FPGA 将采样后的数据存入 RAM，发出信号给单片机，使单片机从 RAM 中读出采样好的数据，再进行运算处理，最后控制 LCD 进行输出。

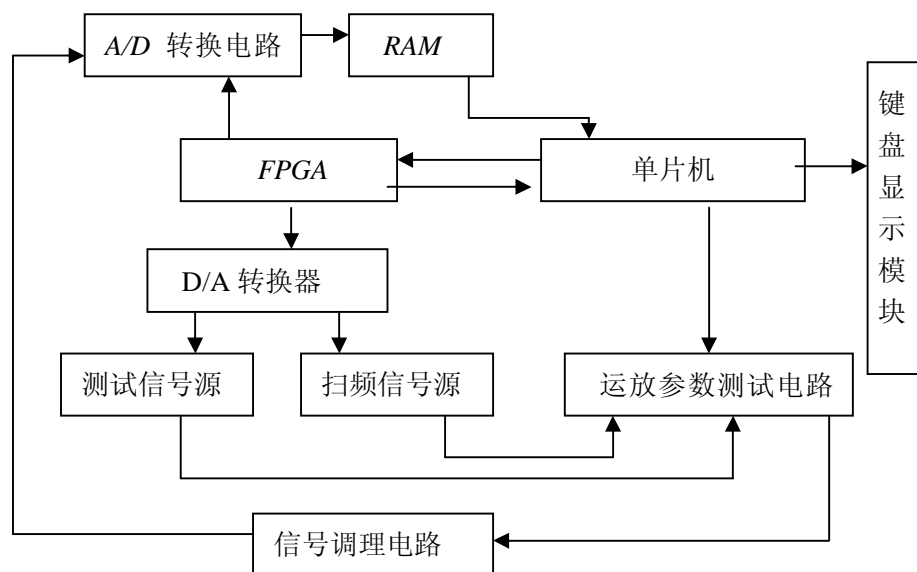


图 1.1.4 系统基本框图

## 2. 系统的硬件设计与实现

### 2.1 系统硬件的基本组成部分

本题是一个含有各种技术的综合设计，在设计中运用到了模拟电子技术、数字电子技术和可编程技术。系统可分为测试部分和智能控制部分。

测试部分：系统完成各种参数的测试，就要运用到各种测试电路。测试部分包括 3 个单元电路：各种参数测试电路、信号调理电路、A/D 采样电路、

控制部分：单片机控制测量参数的选择，并进行对 FPGA 的顶层控制；而 FPGA 实现对 A/D 采样的底层控制，以完成模数转换，再由单片机控制显示。控制部分包括 2 个主要单元电路：单片机控制电路、FPGA 控制电路。

信号源部分：FPGA 产生控制信号并通过 D/A 产生所需的信号源。信号源部分包括两个主要单元电路：低频正弦波信号源、扫频信号源。

### 2.2 主要单元电路的设计

#### 2.2.1 测试部分的单元电路设计

##### (1) 参数测试电路的设计

题目要求能测试  $V_{IO}$ 、 $I_{IO}$ 、 $A_{VD}$ 、 $K_{CMR}$ 、 $BW_G$  五个参数。由于题目附录中给出了每

个参数标准电路，并给出了参考阻值。经过综合考虑，本单元电路利用给出参考阻值，并用继电器进行切换。为保证测量精度，要求  $R$ 、 $R_i$ 、 $R_f$  的阻值准确测量， $R_1$ 、 $R_2$  的阻值尽可能一致； $I_{I0}$  与  $R$  的乘积远大于  $V_{I0}$ ； $I_{I0}$  与  $R_i // R_f$  的乘积应远小于  $V_{I0}$ 。我们取  $R_i = 100 \Omega$ 、 $R_f = 20k \Omega$ 、 $R_1 = R_2 = 30k \Omega$ 、 $R_L = 10k \Omega$ 、 $R = 1M \Omega$ 。由于要求量程切换。在此  $R_f$  可以取两个值进行切换，另一个  $R_f = 200k \Omega$  电路如图 2.2.1 所示：

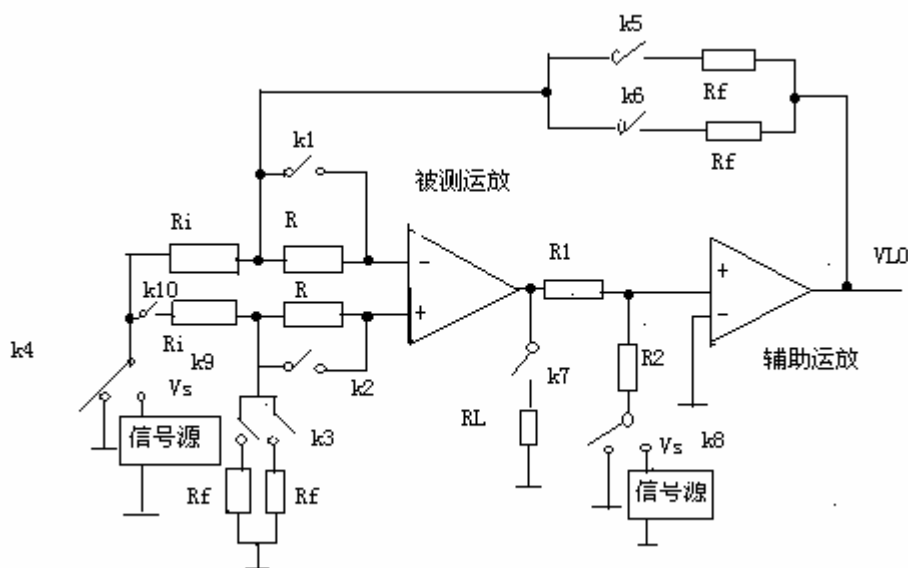


图 2.2.1 测试电路电路图

由于辅助运放的性能好坏对测试结果的精度有直接的影响，因此在选择辅助运放时，我们查找和比较了多种运放的性能参数，通过比较，我们最后选择 OP37A 作为该电路的辅助运放。OP37A 的输入失调电压为  $10\mu V$ ，输入失调电流为  $7nA$ ，交流差模开环增益为  $126dB$ ，交流共模抑制比为  $120 dB$ ，单位增益带宽为  $40MHz$ 。其性能参数和通用运放相比，要小  $1\sim 2$  个数量级，因此，我们采用 OP37A 作为辅助运放。

测试电路的切换通过继电器的通断来控制，当单片机发出模式切换的信号后，由 GAL 门对模式控制信号进行译码，再推动 75451 完成对继电器的控制。在本电路中 GAL 门选择 ATMEL 公司的 ATF16V8B。例如：当单片机发出控制信号 0001，经 GAL 门译码后，通过 75451 推动 K1、K2、K3、K5 闭合，从而使测试电路切换到失调电压的测试状态。根据测量参数和量程切换的要求，本测试电路需要 GAL 门切换 9 种模式，译码结果如表 2.2.1 所示

表 2.2.1 GAL 门控制电路译码表



控制信号	译码结果
0x00	0xFF
0x01	0xCB
0x02	0x8c
0x03	0xAB
0x04	0xCC

(续表 2.2.1)

0x05	0xDC
0x06	0xCE
0x07	0x5C
0x08	0x6E

## (2) 信号调理电路

### ① 低通滤波电路

从测试电路出来的信号会有一些的干扰，这样就会严重影响到后级的测试精度，所以要加上抗混滤波电路，在测试  $BW_G$  时要让高频信号通过，而在测试其他参数时要让低频信号通过，所以采用了继电器切换，在测试  $BW_G$  时是直通的，在测试其他参数时加上低通滤波电路，采用的是二阶有源低通 RC 滤波器。设计电路如图 2.2.2 所示。

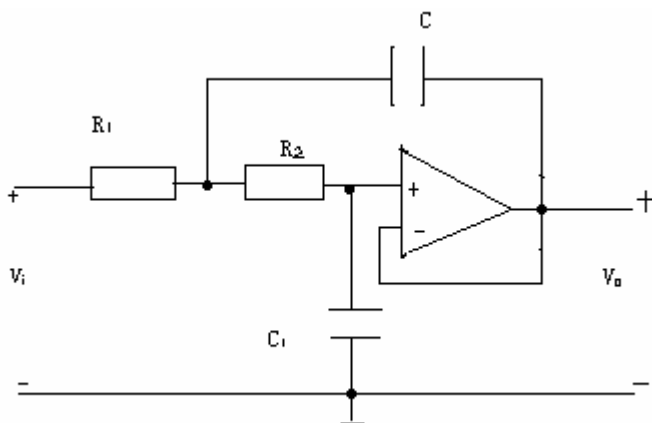


图 2.2.2 低通滤波器

因为  $f = 5\text{Hz}$ ，所以取低通滤波器的截止频率  $f_c = 10\text{Hz}$ ，利用滤波器的快速设计方

法,从表中查出一电容(uF)使其满足  $K = \frac{100}{f_c C}$ ,在此,取增益为 1 对应的电容  $C=4.7\mu$ ,

对应的电阻  $R_1=1.442k\Omega$ ,  $R_2=5.339k\Omega$  又由于  $K=2$ ,可以得到电阻  $R_1=2.884k\Omega$ ,  $R_2=10.678k\Omega$ , 电容  $C_1=1.55\mu$ , 在实际中我们采用的参数是  $R_1=3k\Omega$ 、 $R_2=10k\Omega$ 、 $C=4.7\mu$ 、 $C_1=1.55\mu$ , 可以进行很好的低通滤波。

## ② 高通滤波器

在测试  $BW_G$  时要使扫描信号通过,扫描信号的频率为  $40kHz\sim 4MHz$ , 这就要进行高通滤波电路。由前面方案论证可知,选用二阶高通 RC 有源滤波器。其电路图如图 2.2.3 所示。并且可根据其快速设计方法得出参数值。

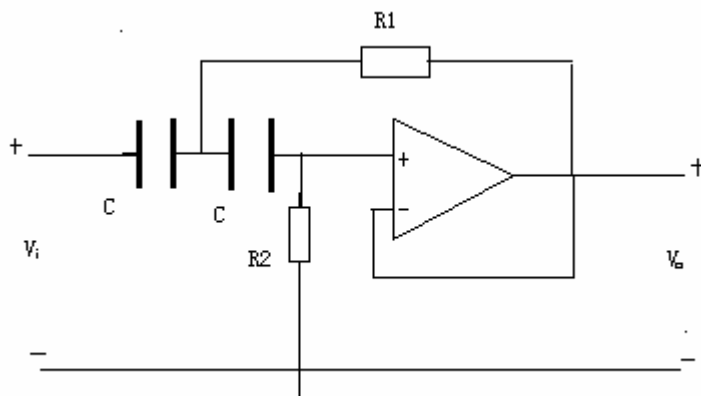


图 2.2.3 高通滤波器

因为扫描信号输出最低频率为  $40kHz$ , 所以设计截止频率  $f_c = 20kHz$ , 因为

$K = \frac{100}{f_c C}$ , 所以  $C=1000p$ ,  $f_c = 20kHz$ , 对应的  $K=5$ 。查表可得:  $R_1 = 5.6k\Omega$ ,  $R_2 = 11.25k\Omega$

(实际取  $10k\Omega$ )。就可得到高通滤波。

## (3) A/D 采样电路

本电路通过 A/D 采样的方式实现对运放测试参数的采集和处理, 由于题目精度要求较高, 经过计算, 只有当 A/D 芯片最小分辨率小于  $10mV$  时, 才能实现达到题目的精度要求因此在本设计中采用 12 位高精度 A/D 转换器 AD1674 作为 A/D 采样芯片。该芯片最小分辨率为  $4.875mV$ , 完全可以达到设计的精度要求, 虽然其转换速率为  $100KSPS$ , 但是由于本设计主要采集的是低频和直流信号, 因此转换速度仍然可以满足设计要求。

## 2.2.2 控制部分的单元电路设计

## (1) 单片机控制电路

单片机选用 MCS-51 系列，由于菜单较复杂，程序代码较长，因此选用了 AD89C55WD 芯片。本系统由 51 单片机的 p2.0~p2.4 口通过 I/O 方式控制测试电路的模式切换，通过 p0 口和 p2 口完成 RAM 内数据的读取。

① 主单片机使用了 4\*4 键盘，128\*64 液晶显示器 (LCD)。

② 单片机按键功能

键 1: 输入失调电压 ;	键 2: 输入失调电流;
键 3: 交流差模开环增益;	键 4: 交流共模抑制比;
键 5: 单位增益带宽;	键 6: 键盘功能说明;
键 A: 自动扫频步进;	键 B: 手动扫频步进;
键 C: 扫频源清零;	键 0: 自动循环测量;

## (2) FPGA 控制电路

FPGA 控制电路框图 2.2.4 如下:

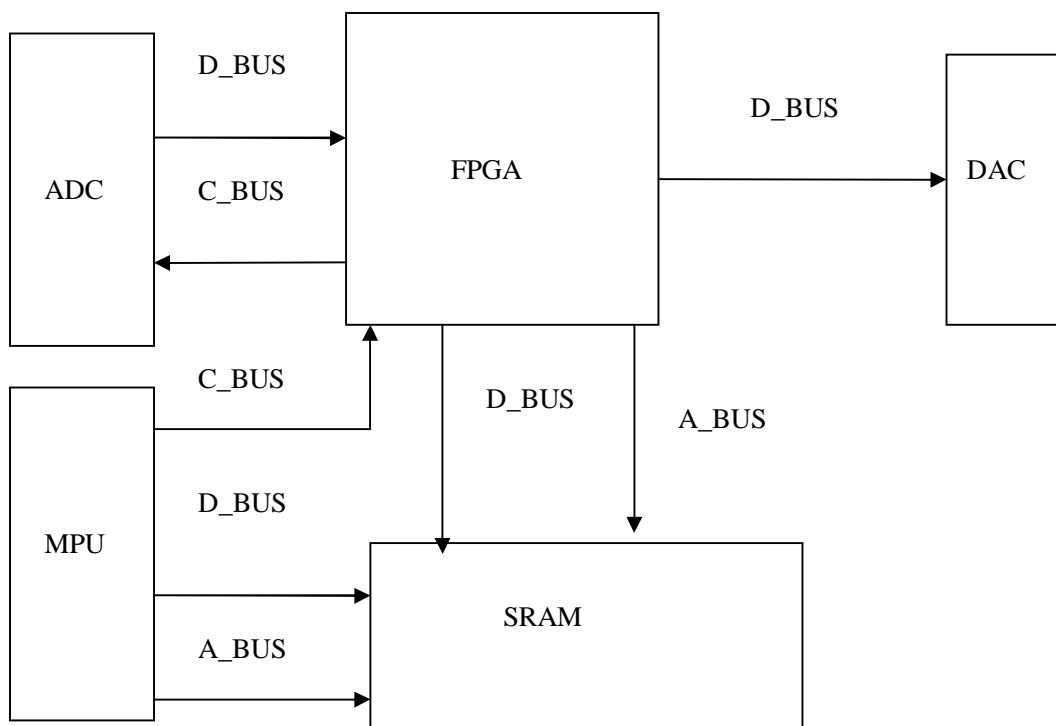


图 2.2.4 FPGA 控制电路框图

当单片机发出采样信号后，FPGA 通过状态机控制 A/D 转换器进行 A/D 采样，将采样完的数据转存进 RAM 中，当进行  $V_{IO}$ 、 $I_{IO}$ 、 $A_{VD}$ 、 $K_{CMR}$  参数测试时，

系统以 160Hz 的速度进行采样,称为慢采样。当测试单位增益带宽时,以 100kHz 的速率全速采样,称为快采样。AD 转换器的控制信号由 FPGA 产生,FPGA 在 AD 转换时获得 SRAM 的控制权,随后读取 AD 转换后的数据,经过内部锁存器后,存入 SRAM,存满一定量的数据后,发出高电平,并释放 SRAM 的控制权通知 MPU 采样已经完成采样,MPU 可以读取 SRAM 中的数据。

本逻辑电路时序比较复杂,而一般的 CPLD 不但容量比较小,且内部不可以集成 ROM 模块,所以采用了 FPGA 型号为 ALTRA 公司的 FLEX EPF10K10LC84—4。

### (3) 信号源部分

信号源是测试运放参数所必须的,因此高精度、高稳定性的信号源对测试数据的影响很大。

#### ① 低频正弦波信号源

DA 转换器的状态为常通状态,转换得数据由 FPGA 提供,实现了用 DDS 产生高精度的 5HZ 的正弦波信号。

#### ② 扫频信号源

扫频信号有 12M 的脉冲可控分频获得,MPU 发出扫频信号,FPGA 利用扫频信号的上升沿,作累加,把累加后的数据,送给可控分频器,产生频率可控信号源。

## 3. 系统的软件设计

### 3.1 系统的总体框图

本系统软件总体框图 3.1.1 如下;

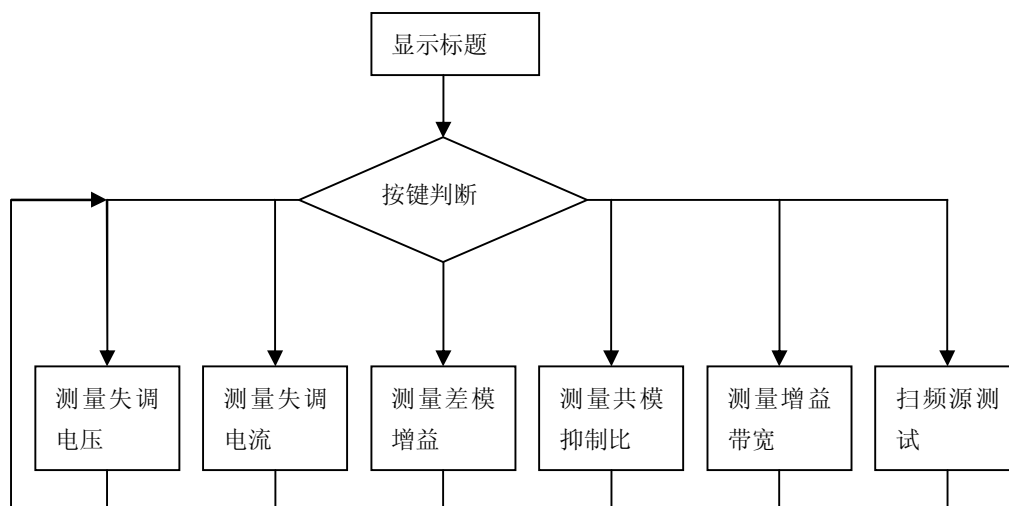


图 3.1.1 系统软件总体框图

### 3.2 失调电压测试子程序

当测试失调电压时，单片机将 A/D 采样的数据读入再进行计算，若小于其设定门限值，则换小量程进行计算，最后由 LCD 进行输出显示。其流程图如图 3.2.1 所示。

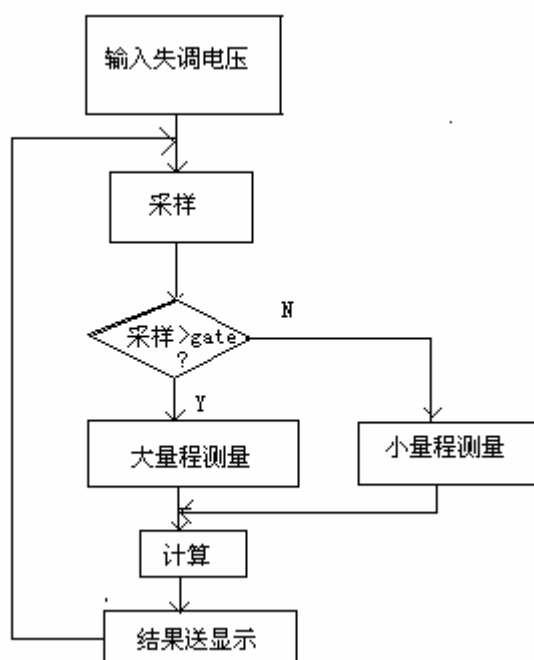


图 3.2.1 失调电压测试流程图

### 3.3 失调电流测试子程序

失调电流测试程序和失调电压测试子程序差别不大，只是在采样后的处理不一样，因为失调电流的测试需要先进行失调电压的测量，再利用失调电压算出其失调电流。其程序流程图如图 3.3.1 所示。

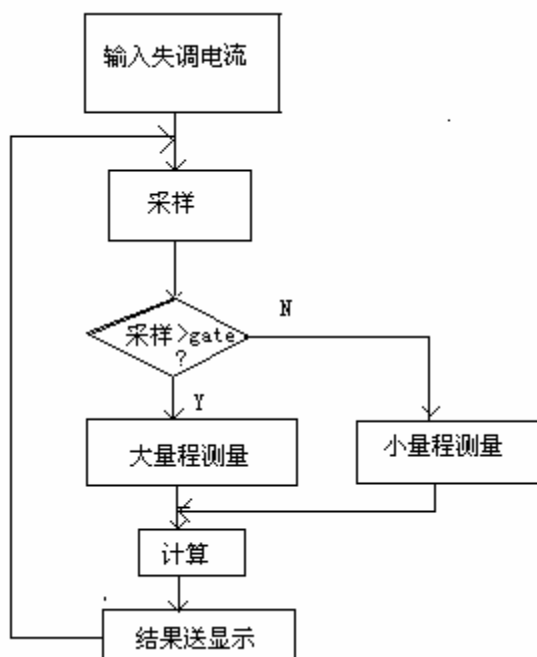


图 3.3.1 失调电压测试流程图

### 3.4 交流差模开电压增益测试子程序

在测试  $A_{vd}$  时，就不用进行量程切换，FPGA 以 160Hz 的采样率进行采样，一个周期采 32 个点，单片机取出已采好的点，先去除直流分量，然后算出其峰-峰值，进一步算出其有效值。再利用公式进行处理，最后送显示。其程序流程图如图 3.4.1 所示。

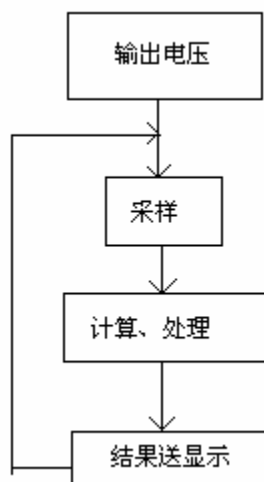


图 3.4.1 交流差模开电压增益测试流程

### 3.5 交流共模开抑制比测试子程序

在测试  $K_{CMR}$  时，就不用进行量程切换，FPGA 以 160Hz 的采样率进行采样，一个周期采 32 个点，单片机取出已采好的点，先去除直流分量，然后算出其峰-峰值，进一步算出其有效值。再利用公式进行处理，最后送显示。其程序流程图如图 3.5.1 所示。

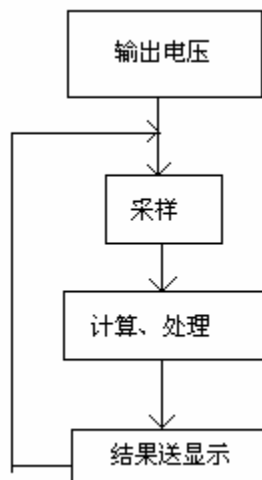


图 3.5.1 交流共模抑制比框图

### 3.6 单位增益带宽测试子程序

在测试  $BW_G$  时，数据处理部分采用的是折半查找法。首先，单片机控制扫频信号源产生 40kHz 的信号，然后，测出当前输出电压的有效值。以此做为比较的基准值，然后单片机控制扫频信号源，步进到 500kHz，再次测量输出电压的有效值，如果电压小于基准值的 0.707 倍，则以一半的步进减小频率值，反之，则增大频率值。如此循环直到找到最接近输出电压基准值 0.707 倍的频率。此算法的优点在于节省了运算的时间，效率大为提高。

## 4. 系统测试

为了确定系统与题目要求的符合程度，我们对系统的关键部分进行了实际的测试。

### 4.1 测试仪器

测试使用的仪器测试使用的仪器设备如表 4.1.1 所示。

表 4.1.1 测试使用的仪器设备

仪器名称	型号	指标	生产厂家	数量
稳压电源	WYK-302B2	0~30V	扬州金通电子有限公司	2

双踪模拟示波器	VP-55648	40MHz		1
双踪数字示波器	A54622A	100MHz	Agilent	1
数字万用表	GDM-8055		利伟仪器公司	1
PC 机	联想 PC	P1.7G/256M 内存	联想公司	1
低频信号发生器	XJ1631	0~1MHz	上海无线电二十一厂	1

## 4.2 指标测试

使用的测试运放为 UA741, 被测试运放的工作电压为  $\pm 15V$ 。

### 4.2.1 标准电路测试

参数	$V_{IO}$	$I_{IO}$	$A_{VD}$	$K_{CMR}$
值	-1.328mV	-2.20nA	94dB	90 dB

### 4.2.2 $V_{IO}$ (输入失调电压) 测试

序号	1	2	3	4	5
$V_{IO}$ (mV)	-1.328	-1.264	-1.104	-0.985	-1.006

### 4.2.3 $I_{IO}$ (输入失调电流) 测试

序号	1	2	3	4	5
$I_{IO}$ (nA)	-2.25	-2.22	-2.19	-2.28	-2.20

### 4.2.4 $A_{VD}$ (交流差模开环电压增益) 测试

序号	1	2	3	4	5
$A_{VD}$ (dB)	94	90	94	100	94

### 4.2.5 $K_{CMR}$ (交流共模抑制比) 测试



序号	1	2	3	4	5
$K_{CMR}$ (dB)	90	88	88	90	90

#### 4.2.6 $BW_G$ (单位增益带宽) 测试

序号	1	2	3	4	5
$BW_G$ (KHz)	601	586	594	583	576

#### 4.2.7 低频信号源测试

序号	1	2	3	4	5
电压有效值 (V)	4	4	4	4	4
频率 (Hz)	5	5	5	5	5

#### 4.2.8 扫频信号源的测试

扫频信号源的输出频率范围为 40KHz~4MHz,

序号	1	2	3	4	4
电压有效值 (V)	2	2	2	2	2

#### 4.2.9 系统实现的功能

基本部分：能够实现对通用运放基本参数的测量；输入失调电压和输入失调电流的误差绝对值小于 3%，交流差模开环电压增益和交流共模抑制比的绝对值误差小于 3dB；系统能够提供频率为 5Hz，电压有效值为 4V 的正弦波信号，且误差小于 1%；自己制作了标准测试电路，并且能准确测量其参数。

发挥部分：系统能够输出一个频率范围为 40KHz~4MHz 扫频信号源，且误差绝对值小于 1%；并且系统有单位增益带宽的测试功能；系统增加了自动循环测量功能。

## 5. 总结

本次设计竞赛，我们采用了单片机技术、在系统可编程技术和模拟技术使三者有机的结合起来。设计理念先进，性能稳定。在测量方面采用了高精度数字测量方法，确保了测量的精度和测量的稳定性。此次竞赛我们多采用了良好的人机界面环境，取得了相当好的显示效果。

本次电子设计竞赛促进了我们的团队合作精神，在设计制作的过程中我们充分发挥了团队合作精神。这次竞赛的过程使我们有了一次深刻的经历，我们利用了已学的知识，发挥了自己的才智将课本中介绍的理论方法变成了一种实实在在的作品，我们深深感觉到理论联合实践的重要。另外，这次经历使我们更体会到任何的艰难困苦乃至绝望的时候一定要保持必胜的信心和坚定的信念。通过这次竞赛我们更加明确了个人以后奋斗发展的目标。

## 6 参考文献

1. 全国大学生电子设计竞赛组委会.. 全国大学生电子设计竞赛获奖作品汇编（第一届~第五届）. 北京：北京理工大学出版社，2004年
2. 黄智伟. 全国大学生电子设计竞赛训练教程. 北京：电子工业出版社，2005年
3. 黄正瑾. 电子设计竞赛赛题解析. 南京：东南大学出版社，2003年
4. 田良，王尧，黄正瑾，陈建元，束海泉. 综合电子设计与实践. 南京：东南大学出版社，2003年
5. 谢自美. 电子线路设计·实验·测试（第二版）. 武汉：华中理工大学出版社，2002年
6. 阎石. 数字电子技术基础（第四版）. 北京：高等教育出版社，1998年
7. 童诗白，华成英. 模拟电子技术基础. 北京：高等教育出版社，2001年

—