
集成运放测试仪设计报告

学 校：
姓 名：
姓 名：
姓 名：

集成运放参数测试仪设计报告

内容摘要:

本文介绍了运算放大器闭环参数的测试原理,分析了影响运算放大器闭环参数测试精度和稳定性的诸多原因和因素,及所采取的针对性措施,还探讨了闭环参数的测试精度、测试稳定性和测试适应性的评价问题。此系统以凌阳 16 位单片机为核心,采用凌阳的片载 AD 与 DA 使系统简洁功能强大。输出采用 240128 LCD 显示,可以显示多种字符及图形,拥有友好的人机界面及强大的显示功能。特别适用于智能控制的可编程人性化显示,并实现了菜单式中文图形界面,增强了系统的易用性。系统采用 MAX038 作为信号源,可以输出一定范围内的任意频率可调,灵活易用。外围单片机采用 AT89C55 单片机进行液晶屏的控制,键盘的驱动等。

This text introduce operation amplifier close test principle , ring of parameter , is it influence operation amplifier close ring parameter test precision and a great deal of reasons and factors of the stability to analyse, and the pertinence measures taken, have also probed into the precision of test of closing the ring parameter, appraisal question of testing the stability and testing adaptability . System this in order to is it as core , adopt AD and DA make the system succinct and powerful a year in Yang such as Ling to insult male genital 16 one-chip computer. Is it adopt 240128LCD show , can show many kinds of character and figure , have friendly man-machine interface and strong display function to output. The programmable humanization very much apply to intellectual control shows , have realized the menu type Chinese figure interface, have strengthened the apt using of the system. The system adopts MAX038 to do the signal source, it is adjustable , flexible and easy to use in frequency conversion that can output the signal . The peripheral one-chip computer adopts AT89C55 one-chip computer and carries on the control that the liquid crystal rejected , drive of the keyboard ,etc..

关键词: 凌阳单片机 人机界面 信号源

第 1 章 绪论

1.1、设计任务

设计并制作一台能测试通用型集成运算放大器参数的测试仪，示意图如图 1 所示。

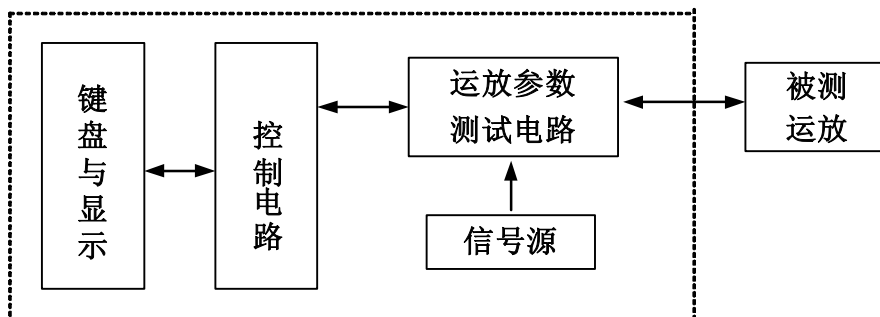


图 1

1.2、设计要求

1.2.1、基本要求

- (1) 能测试 V_{IO} (输入失调电压)、 I_{IO} (输入失调电流)、 A_{VD} (交流差模开环电压增益) 和 K_{CMR} (交流共模抑制比) 四项基本参数，显示器最大显示数为 3999；
- (2) 各项被测参数的测量范围及精度如下(被测运放的工作电压为 $\pm 15V$):
 - V_{IO} : 测量范围为 $0\sim 40mV$ (量程为 $4mV$ 和 $40mV$)，误差绝对值小于 3% 读数+1 个字；
 - I_{IO} : 测量范围为 $0\sim 4\mu A$ (量程为 $0.4\mu A$ 和 $4\mu A$)，误差绝对值小于 3% 读数+1 个字；
 - A_{VD} : 测量范围为 $60dB\sim 120dB$ ，测试误差绝对值小于 3dB；
 - K_{CMR} : 测量范围为 $60dB\sim 120dB$ ，测试误差绝对值小于 3dB；
- (3) 测试仪中的信号源(自制)用于 A_{VD} 、 K_{CMR} 参数的测量，要求信号源能输出频率为 $5Hz$ 、输出电压有效值为 $4V$ 的正弦波信号，频率与电压值误差绝对值均小于 1%；
- (4) 按照本题附录提供的符合 GB3442-82 的测试原理图(见图 2~图 4)，再制作一组符合该标准的测试 V_{IO} 、 I_{IO} 、 A_{VD} 和 K_{CMR} 参数的测试电路，以此测试电路的测试结果作为测试标准，对制作的运放参数测试仪进行标定。

第 2 章 方案比较与论证

运算放大器测量仪是一个相当复杂的仪表。涉及国标检测电路、精密电压测量、自动测量档位控制、DDS 高频信号合成、扫频与测量、人机界面、多任务协调、数字滤波等许多方面。在如此复杂的软硬件任务的条件下，常规硬件设计显得有些力不从心。有以下几个设计方案：

2.1、采用 OS2 R2TX-TINV 等可用于单片机的嵌入式操作系统利用任务切换形式完成多程序并行操作与响应。这种方案的优点是编程相对简单、任务明确、易于扩展。它的缺点是当利用于 51 单片机等低端 8 位单片机时，占用系统资源过大。往往需要外扩 SRAM 和 ROM 等手段扩充硬件资源，增加系统硬件的复杂程度。在任务为较简单的操作时往往得不偿失，实时性也很难保证。若采用高端的

单片机势必会增加成本，所以未选择此种方案。

2.2、协调和利用单片机内部多个时钟中断源。时分制的并行处理多个任务与响应，这种方案的优点是在任务较简单时，占用系统资源极少，系统利用率高且无须外扩硬件，可靠性好，容易把握实时性。它的缺点是当任务较大时会造成时钟中断过长，多中断互相嵌套冗杂等情况，造成程序混乱，尤其是在各任务所需处理中断时间不一的时候，最容易发生。同时由于单个单片机数据处理能力有限，不可能处理过于复杂的任务，所以我们未采用此种方案。

2.3 用多个单片机各司其职协调合作，分别完成不同的任务。虽然一定程度上增加了硬件的复杂程度，但有利于模块化设计，并且与采用高端单片机相比更可行，低廉。所以我们选用此种方案。

在多单片机合作协调时，最大的难点是数据和命令在各单片机间传输的总线的结构设计问题。有以下几种方案：

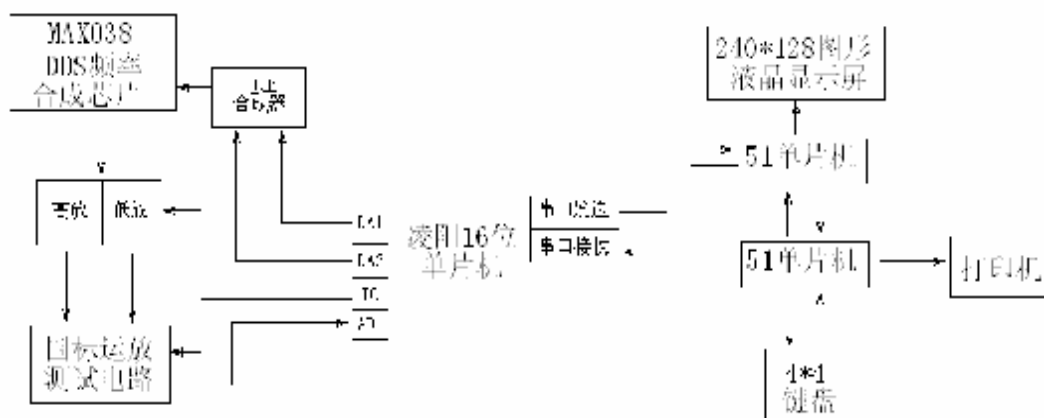
2.3.1、采用单总线分支机构，以相同的数据命令传输协议，用呼号形式统一传输数据和命令。其优点是：可在任意分支单片机间双向数据连接，且硬件相对简单，可广播式发送数据与命令，且不用区分主从机。其缺点是：传输数据时只能有一个单片机发送信号，其他单片机只能接收，容易形成各单片机间抢占总线等问题。需要相应的总线仲裁机构来完成总线资源分配，硬件将相对复杂。我们的系统需要大数据流单向传输和小命令流双向传输，所以不能用此结构。

2.3.2、树状主从式总线机构，这种总线的最大优点是有益于数据从主机到从机之间的传输，易于寻址。适合于多路信号采集的汇总和主机对从机的操作。其缺点是：数据传输路径固定，在中继单片机运行时占用不必要的系统资源，不利于各分机之间的数据交流。

2.3.3、多总线、控制线传输机构，由于本作品设计的独特性，结合单片机硬件特点，采用多种专用控制总线。因此没有传输协议，以增大传输速率。

辅助CPU连接着液晶显示屏、打印机、键盘等模块。由于数据传输较为简单，分别采用若干IO控制线对其控制。

以下将详细介绍各个组成部分：



2.4 主控芯片：

方案 1：采用 51 系列单片机，51 单片简单易用，但考虑到本系统的复杂性，需要用到多片 51 单片机，这将使系统显得臃肿，也增大了开发的难度。

方案 2：采用凌阳 16 位单片机。SPCE061A 是继 μ^n SP™ 系列产品 SPCE500A 等之后凌阳科技推出的又一个 16 位结构的微控制器。与 SPCE500A

不同的是,在存储器资源方面考虑到用户的较少资源的需求以及便于程序调试等功能,SPCE061A 里只内嵌 32K 字的闪存 (FLASH)。较高的处理速度使 μ 'nSP™能够非常容易地、快速地处理复杂的数字信号。因此,与 SPCE500A 相比,以 μ 'nSP™为核心的 SPCE061A 微控制器是适用于数字语音识别应用领域产品的一种经济的选择。

性能如下:

16 位 μ 'nSP™微处理器;

工作电压: V_{DD} 为 2.6~3.6V(CPU), V_{DDH} 为 V_{DD} ~5.5V(I/O);

CPU 时钟: 0.32MHz~49.152MHz ;

内置 2K Words 的 SRAM;

内置 32K Words 的 FLASH;

可编程音频处理;

系统处于备用状态下(时钟处于停止状态),耗电小于 $2\mu A@3.6V$;

2 个 16 位可编程定时器/计数器(可自动预置初始计数值);

2 个 10 位 DAC(数-模转换)输出通道;

32 位通用可编程输入/输出端口;

14 个中断源可来自定时器 A / B, 时基, 2 个外部时钟源输入, 键唤醒;

具备触键唤醒的功能;

使用凌阳音频编码 SACM_S240 方式(2.4K 位/秒), 能容纳 210 秒的语音

数 据;

锁相环 PLL 振荡器提供系统时钟信号;

32768Hz 实时时钟;

7 通道 10 位电压模-数转换器(ADC)和一个单通道的声音专用模-数转换

器;

声音模-数转换器输入通道内置麦克风放大器和自动增益控制(AGC)电

路;

具备串行设备接口;

具有低电压复位(LVR)功能和低电压监测(LVD)功能;

内置在线仿真电路 ICE (In- Circuit Emulator) 接口;

具有保密能力;

具有 WatchDog 功能 (由具体型号决定)

使用这种 CPU 可以大大简化系统设计, 并且它的计算能力也能满足本作品的需要。

2.5 AD 采样输入部分

前向通道的作用是对被测信号进行调理、量化。并将量化结果存入存储器, 以被显示之用。它是整个设计的核心。

ADC 采用自动方式工作, 硬件 ADC 的最高速率限定为 $(F_{osc}/32/12)$ Hz, 如果速率超过此值, 当从 P_ADC (读) (S7014H) 单元读取数据时会发生错误。ADC 在各种系统时钟下的频率响应为:

FOSC(MHz)	20.4	24.57	32.76	40.9	49.15
)	8	6	8	6	2
ADC 响应率 (KHz)	640	768	1024	1280	1536

最大采样率 (Samplerate_max) 为 Samplerate_max=ADC 响应率

/16=1536KHz/16=96KHz。

第3章 系统设计

3.1 信号调理电路的设计

A/D 对输入的模拟信号的幅值有一定的要求范围。为 0~2V，而对于待测信号来说其幅值各不相同，有时大大超出了 A/D 所如许的最大输入范围，造成饱和失真，甚至烧毁硬件。有时信号较小，使 A/D 转换结果产生很大相对误差，甚至不响应。这些因素都使得无法对信号进行准确的测量。

信号调理电路的作用就是将不同幅度的输入信号都归整到适合 A/D 采集的输入信号范围，具体来说，就是对大的输入信号进行衰减，对小信号则要放大。

放大我们采用可编程增益放大器。PGA103，对输入信号进行调理。通过对可编程器件的控制，使其放大倍数可以为 *1、*10 两种不同值，来满足对大小不同信号的放大要求。

对于待测信号来说其幅值各不相同，我们在信号输入端加了前级衰减，从而将大信号进行相应的衰减，以满足不同幅度的输入信号都归整到适合 A/D 的输入信号范围。具体方法实现同样是采用数字电位器做精密衰减控制。我们采用 256 抽头的 DCP(数字电位器)，此数字电位器与系统采用 SPI 串行通讯方式，其控制总线少，体积结构小，对其控制较为灵活、方便，其最大的优点是数据的非易失性，当系统突然掉电时，数字电位器内部的存储单元会将当前值进行存储，待系统上电时，其存储数据即可恢复，实现数据的保存。

其控制方法简洁，方便，并且精度较高。

3.1.2 采样方式的选择

再现代数字采集、存储系统中，通常有两种采样方式：实时采样和等效采样。

方案一：实时采样

实时采样是在信号存在期间对其采样。根据奈奎斯特采样定理，采样频率必须高于被测信号中最高频率分量的 2 倍，对于周期正弦信号，一个周期应该有两个采样点，考虑到实际因素的影响，为了不失真的恢复原被信号，通常对被测信号的一个周期至少应该有 5 个采样点，原被测信号不失真的恢复也受到 A/D 的采样深度的限制。实时采样方法简单，易于实现，当被测信号频率不是很高时，实时采样方法较为理想。如图 1—1 所示

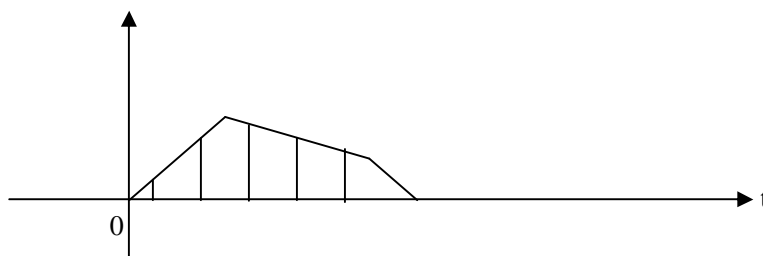


图 1—1 实时采样

方案二：等效采样

由于采样器工作的速率的限制，实际上在被测信号的频率较高时很难实现实时采样。并且采样速率愈高，要求 A/D 的转换速率愈高，其价格愈高。所以在价

格上很难接受。但对于周期信号可以采用等效采样方法。其中又分为顺序和随机等效采样方法。所谓顺序采样是对每一个信号周期仅采样一点，经过若干个信号周期后，就可以将被测信号的各个部分采样一遍，这种采样方法可以使采样点借助于“步进延迟”方法均匀的分布于被测信号波行的不同位置。所谓步进延时，是每一次采样比上一次采样点的位置延时 Δt 时间。如图 1—2。

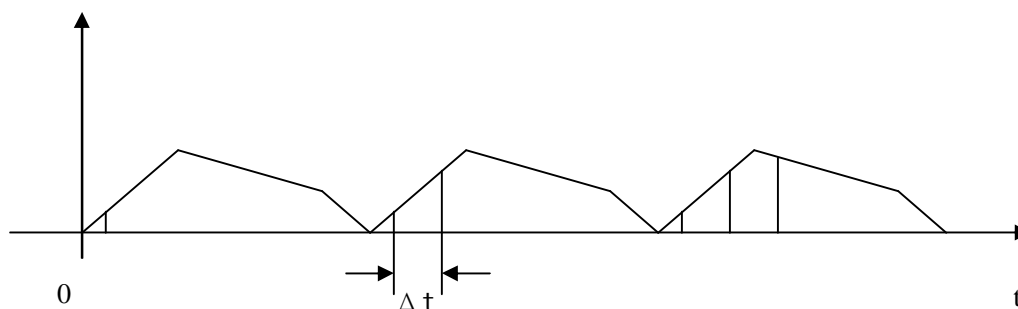
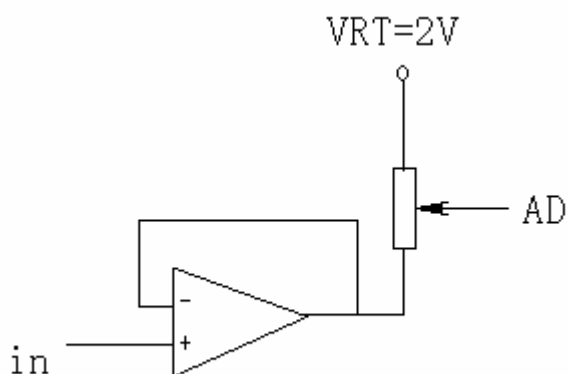


图 1—2 等效采样

等效采样虽然对很高频率的信号进行采样，但“步进延迟”的方法很难在短时间内实现，本设计要求信号频率 5Hz 非常低。所以，在本设计中我们采用实时采样方法。

3.2 电平移位电路

由于被测信号是双极性的，即被转换的模拟信号为正或负极性，而 A/D 的输入信号通常为单极性信号。为了对双极性信号的测量，以及适应 A/D 的要求，在进行 A/D 转换之前必须将双极性信号转换为单极性信号，所以我们设计了电平移位电路，在本设计中可将被测信号移位为单极性信号。电平转换电路，如图



用电位器精确分压生成一个电压为参考电压二分之一的偏置信号，然后信号通过 OP-07 组成的射随器隔离，跟输入信号混合，完成电平移位。

3.3 滤波电路的设计

被测信号的频谱分量较多，其中必然夹杂着许多高次谐波的干扰，这样对测量精度有严重的影响。所以，我们在被测信号的输入端加了一级低通滤波器，它

可以有用的频率信号通过，而抑制（或大为衰减）无用的频率信号，这样许多高频干扰信号被滤除，提高了测量的精度。实现低通滤波器有下面几种方案。

方案一：采用切比雪夫滤波器

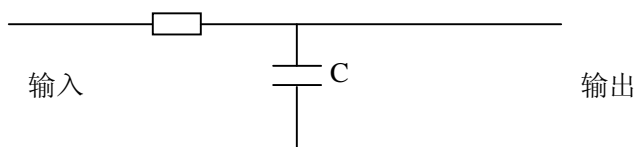
切比雪夫滤波器的显著特点是，其逼近误差峰值在一定规定的范围的频段尚为最小，而且是等纹波的即误差值在极大和极小值之间摆动。

方案二：二阶 BUTTERWORTH（巴特沃兹）低通滤波器

二阶巴特沃兹滤波器，如 MAXIM 公司的 MAX291，其优点是通带内特性曲线平坦，但是其从导通到截至频率的坡度较为缓慢，且价格较高。

方案三：RC 积分滤波器

RC 积分滤波器使用方便，体积小，却完全满足本设计要求。其频率特性为： $F(j\Omega)=1/(1+j\Omega\tau)$ ，其中 $\tau=RC$ 为时间常数。如图



我们选择的这种滤波器时间常数取 5τ 。

3.4 键盘模块：

方案一 采用矩阵式键盘，此类键盘采用矩阵式行列扫描方式，优点是当按键较多时可降低占用单片机的 I/O 口数目，缺点为电路复杂且会加大编程难度。

方案二 采用独立式按键电路，每个按键单独占有一根 I/O 接口线，每个 I/O 口的工作状态互不影响，此类键盘采用端口直接扫描方式。缺点为当按键较多时占用单片机的 I/O 口数目较多，优点为电路设计简单，且编程极其容易。

综合考虑两种方案及题目要求，方案一需要 8 个 I/O 口，方案二需要 11 个 I/O 口，考虑到系统资源，故采用方案一。

3.5 液晶模块：

方案 1：使用数码管显示，该方案控制最简单，但是只能显示非常有限的符号和数字，对于设计中复杂的显示功能显然不能胜任。

方案 2：使用点阵液晶显示，点阵液晶可以显示多种字符及图形，拥有友好的人机界面及强大的显示功能。特别适用于智能控制的可编程人性化显示。权衡之后，决定选用方案 2，并实现了中文图形界面。

3.6 打印模块：

方案 1：采用台式打印机，台式打印机打印效果最好，能够打印出各种复杂的图形，但其价格也是最高的。

方案 2：采用面板式微型打印机，这种打印机体积小，能够打印中英人，也能打印图像，能够满足要求。

综上两种方案，我们选用面板式微型打印机，用单片机控制其打印数据与文字。

输出设备构架如图 1：

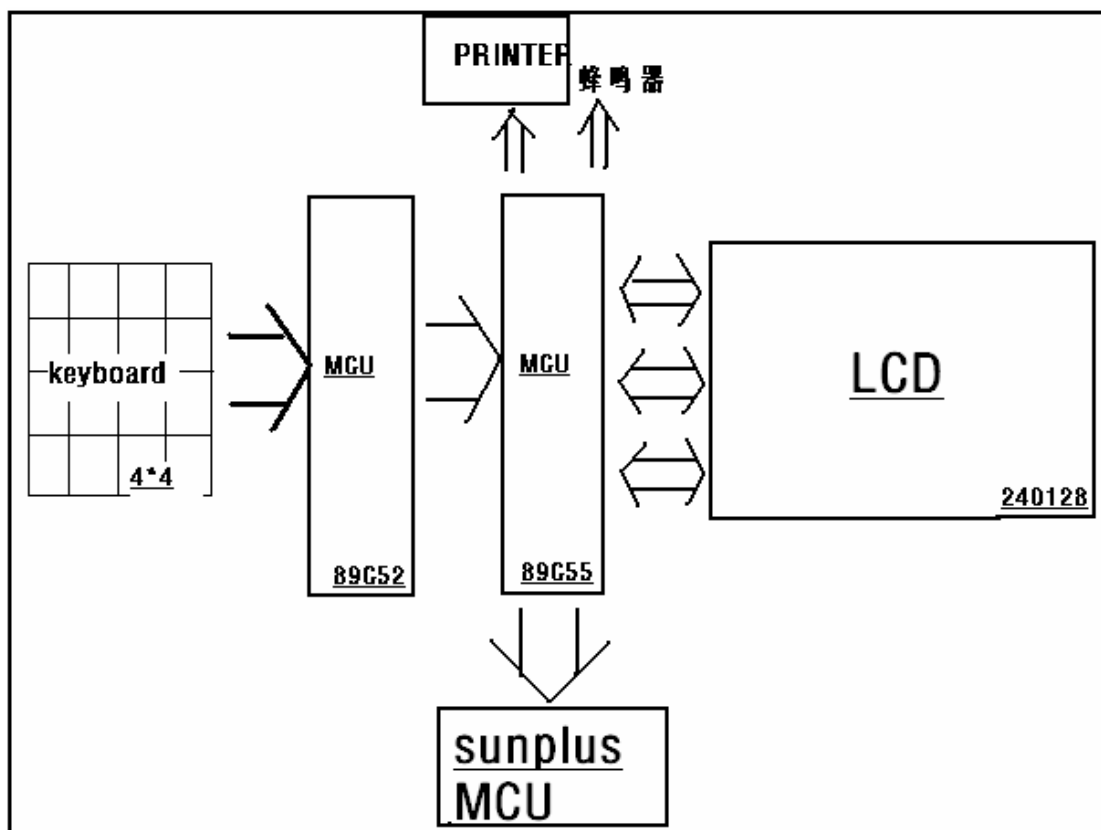


图 1

3.6.1 液晶驱动部分:

本系统采用 240128 点阵图形液晶模块，它采用 T6963C 作控制器。

T6963C 的特点:

T6963C 是点阵式液晶图形显示控制器，它能直接与 80 系列的 8 位微处理器接口;

T6963C 的字符字体由硬件设置，其字体有 4 种：5*8、6*8、7*8、8*8;

T6963C 的占空比可从 1/16 到 1/128;

T6963C 可以图形方式、文本方式用图形和文本合成方式进行显示，以及文本方式下的特征显示，还可以实现图形拷贝操作等等;

T6963 具有内部字符发生器 CGROM，共有 128 个字符，T6963C 可管理 64K 显示缓冲区及字符发生器 CGRAM。并允许 MPU 随时访问显示缓冲区，甚至可以进行位操作。

3.7 关于软件的一些算法

软件滤波算法:

3.7.1、递推平均滤波法（又称滑动平均滤波法）

优点:

对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高
适用于高频振荡的系统

缺点:

灵敏度低

对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用较差

不易消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差

不适用于脉冲干扰比较严重的场合

比较浪费 RAM

3.7.2、中位值平均滤波法（又称防脉冲干扰平均滤波法）

优点：

融合了两种滤波法的优点

对于偶然出现的脉冲性干扰，可消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差

缺点：

测量速度较慢，和算术平均滤波法一样

比较浪费 RAM

3.7.3、加权递推平均滤波法

优点：

适用于有较大纯滞后时间常数的对象

和采样周期较短的系统

C、缺点：

对于纯滞后时间常数较小，采样周期较长，变化缓慢的信号

不能迅速反应系统当前所受干扰的严重程度，滤波效果差

3.7.4、消抖滤波法

优点：

对于变化缓慢的被测参数有较好的滤波效果，

可避免在临界值附近控制器的反复开/关跳动或显示器上数值抖动

缺点：

对于快速变化的参数不宜

如果在计数器溢出的那一次采样到的值恰好是干扰值，则会将干扰值当作有效值

导入系统。

3.8. 关于信号源部分

信号源由 MAXIM 公司生产的 MAX038 芯片产生，其性能特点主要有以下几点：

(1)能产生精确的高频正弦波、矩形波(含方波)、三角波和锯齿波，输出波形既可以人工设定，亦可以由微机或其它数字手段控制；

(2)频率范围很宽，从 0.1 Hz 直到 20 MHz，最高可达 40 MHz，频率设定分为粗调和细调两种。改变振荡电容充、放电电流，可大幅度调节频率，改变 FADJ 端的电位，能对频率进行精细调节；

(3)对于输出波形，电压幅度均为 2 V(P-P)，对于地电位而言则是一 1 V-+1V，输出阻抗小于 0.1 Ω ，低阻抗输出能力可以达到~20 mA；

(4)占空比调节范围宽，最大调节范围为 10%~ 90%(一般应用在 15%~85%的范围内)，且占空比与频率均可单独调节，互不影响；

(5)输出波形失真小，正弦波总谐波失真度仅为 0.75%，占空比调节的非线性度只有 2%；

(6)内部基准电压源的电压值为 2.50-0.02 V，电压温度系数低至 20 \times 10⁻⁶ / $^{\circ}$ C，利用该基准电压源不仅可以提供充、放电的电流，以确定频率值，还

能设定 FADJ 端的电压, 实现频率微调, 此外还可设定 DADJ 端的电压, 调节占空比;

(7) 内含一个相位比较器, 用于锁相环;

(8) 具有扫描工作方式, 扫描电压外部设置;

(9) 采用 5 V 双电源供电, 电压范围 $\pm 4.75 \sim \pm 5.25$ V, 允许变化 $\pm 5\%$, 电流约 80 mA, 典型功耗为 400mW。

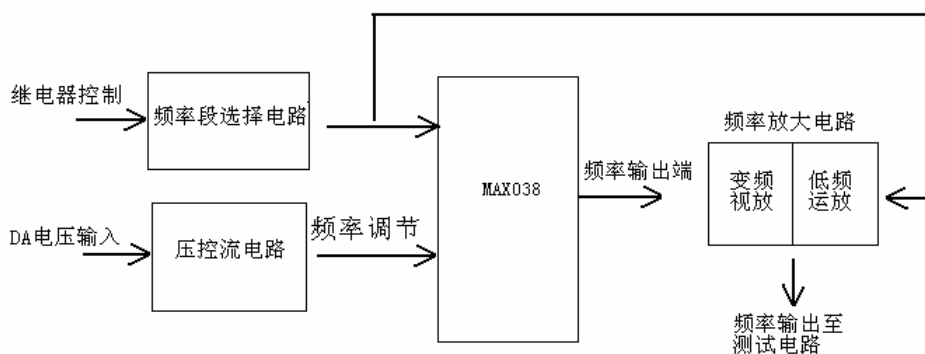
MAX038 的主要应用有精密函数波形发生器、压控振荡器、频率调制器、脉宽调制器、锁相环、频

率合成器、正弦波或矩形波调频发生器等。以下是它的内部功能结构框图。

由上我们可知道 MAX038 芯片是一款功能非常强大的信号产生类芯片, 根据本题目实现功能的要求我们只需要控制其输出频率的变化在 40K 到 4M 之间即可, 只要选择好合适的振荡电容, 再用足够精度的电流控制其振荡频率控制器, 就能做到频率以预期的变化率变化。

根据题目基本部分和发挥部分有不同的要求, 即第一次输出为固定不变的 5Hz 频率, 第二次输出为从 40K 到 4M 按一定的速率变化的频率, 由此条件可以计算出接入 MAX038 振荡电路的电容值, 再用一继电器根据测试项目进行切换, 这里需要说明的一点是, 在本电路中我们选择对输出频率放大副度进行放大的芯片为两种, 一种是在高频状态下进行副度放大, 我们选用 MAXIM 公司的高速视频运放 MAX4104, 其最高速度可工作在 750M 的频率下, 而其至命的弱点是在当它工作在低频状态下时芯片立刻会被烧坏, 也正是因为如此我们才选择用 LF356 进行低频条件下的频率副度放大, 综合以上各种条件绘制出如下图所示的信号源产生电路结构图如下

信号源产生电路结构图



对上图电路各个部分现做简要的说明。

一, 频率段选择电路: 频率段的选择主要是针对整个测量过程中存在的两种状态进行选择, 即固定不变的 5Hz 测量频率与从 40K 到 4M 连续变化的扫描频率, 对这两段的选择是通过核心处理芯片来控制的, 对不同的测量选择相应的值即可, 而其中的值主要即为振荡电容的大小与输入给频率调节端口电流的大小来决定, 对电流调节其中心频率变化的过程将会在下面的小节中讲述.

二, 压控流电路: 其实所谓的压控流源就是将电压信号转换成电流信号, 我们之所以这样做, 主要是因为 MAX038 芯片的频率粗调控制端是通过接收电流强弱信号来决定输出频率大小的, 而一般情况下我们很少对直流的大小进行控制, 而是通过 DA 对输出电压进行控制, 在这里我们同样通过 DA 对电压的大小进行控制, 而有一特别之处需要说明的是, 由于核心器件为凌阳十六位单片机, 它本身自带有两个十位精度的 DA, 但考虑到仅用十位精度来控制 4K 到 40M 变化的频率, 并且变化精度不大于 1K 的条件, 仅用凌阳自带的一个 DA 是不能达到要求的, 所以我们采用将凌阳片内两个十位精度电流输出的 DA 进行整合变成一个二十位精度电压输出的 DA, 这样的电压输出精度再经过压流变化后将达到相当的精度, 足以满足题目给出小于 1K 变化率的精度, 这也是本次我们做题中的一大创新点.

三, 频率放大电路: 题目要求 5Hz 为固定 2V 正弦波或为 4K 到 4M 幅度为 4V 的正弦波, 由于有幅度的改变所以我们用两块运放各自处理不同频率和不同幅度的正弦波, 在两者之间切换采用继电器由核心处理芯片对起进行控制.

第 4 章 系统调试

4.1 硬件调试

4.1.1 利用标准板测运算放大器 mA741

(1) 的输入失调电压

a 将开关 K2 断开, 将开关 K1 闭合, 用 7 位半的数字电压表, 测输出电压 $V_{OL} =$, 则 $V_{IO} =$

b 将开关 K2 闭合, 开关 K1 断开, 用 7 位半的数字电压表, 测辅助运放的输出电压 $V_{OL} =$, 则 $V_{IO} =$

(2) 测输入失调电流

a、将开关 K2 断开, K1 闭合, 测辅助运放输出电压 V_{L0} , 将开关 K1 断开, 测得辅助运放的输出电压 V_{L1} , 则有 $V_{IO} = \frac{100}{100+10^5} \cdot \frac{V_{L1}-V_{L0}}{10^4}$

b、将开关 K2 闭合, K1 闭合, 测 V_{L0}
将 K1 断开, 测 V_{L1} , 则有 $V_{IO} = \frac{100}{100+10^4} \cdot \frac{V_{L1}-V_{L0}}{10^4}$ 。

(3) 测交流差模开环电压增益 A_{VD}

K4、K5 闭合, 用信号源产生一频率为 5Hz, 有效值为 4V 的正弦波, 用数字示波器测信号源的输出电压 V_S , 及辅助运放的输出电压 V_{L0} , 由

$$A_{VD} = 20 \lg \left(\frac{V_S}{V_{L0}} \frac{100+10^5}{100} \right) dB$$

(4) 测交流共模抑制比 K_{CMR} .

同上可测得交流共模抑制比.

第 5 章 指标测试

5.1 测试仪器

双直流稳压电源 HH1713
 数字示波器 DS510ZC
 伟福编译器+S51+
 七位半数字仿真器 5000 DMM/SCANNER
 四位半数字仿真器 GDM-8145
 信号源 SG1641A

5.2 指标测试

K1	K2	VLo(V)	Vlo(mV)
闭合	断开	-2.212	-2.212
闭合	闭合	-2.123	-2.230

K1	K2	VLO(V)	VL1	VIO	IIO
闭合	断开	-2.212		-2.212	
闭合	闭合	-1.123		-1.230	
断开	断开	-2.012	-2.033	-0.0025	
断开	闭合	-1.123	-1.1142	-0.0089	

参考文献

- [1]潘松, 黄继业编著. 电子测量技术实用教程[M] 北京: 科学出版社, 2002.
- [2]徐志军, 徐光辉编著. 模拟电路与数字设计[M] 北京: 电子工业出版社, 2002: 58—77.
- [3]潘永雄, 沙河, 刘向阳. 编著. 电子线路 CAD 实用教程[M] 西安电子科技大学出版社, 2001: 17—49, 81—85, 187—194, 204—256.
- [4]吕思忠, 施齐云. 数字电路实验与课程设计[M] 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001: 17—47, 200—211.
- [5]余家春. Protel 99 SE 电路设计实用教程 [M] 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [6]田良, 王尧, 黄正瑾, 陈建元, 束海泉编著. 综合电子设计与实践[M] 东南大学出版社, 2002. 3: 103—115, 269—272.
- [7]谢自美等编著. 电子线路设计·实验·测试(第二版)[M] 华中理工大学出版社, 2000. 7: 247—252, 380—388.
- [8]安钟利编著. Word 2000 和 WPS 2000 文字处理好帮手[M] 电子科技大学出版社, 1999. 9: 30—32, 42—48.
- [9]张俊, 顾新. 编著. 电子系统设计与实践(修订版) [M]西安电子科技大学出版社, 2004. 6: 11—34.
- [10]王松武, 于鑫, 武思军. 编著. 电子创新与实践[M] 国防工业出版社, 2005. 1: 7—11, 165—185.
- [11]包明, 赵明富, 陈渝光. 编著. EDA 技术与数字系统设计[M] 北京航空航天大学出版社, 2002. 7: 45—50, 57—67.

