



西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

弱信号处理类赛题分析

西安交通大学 张鹏辉

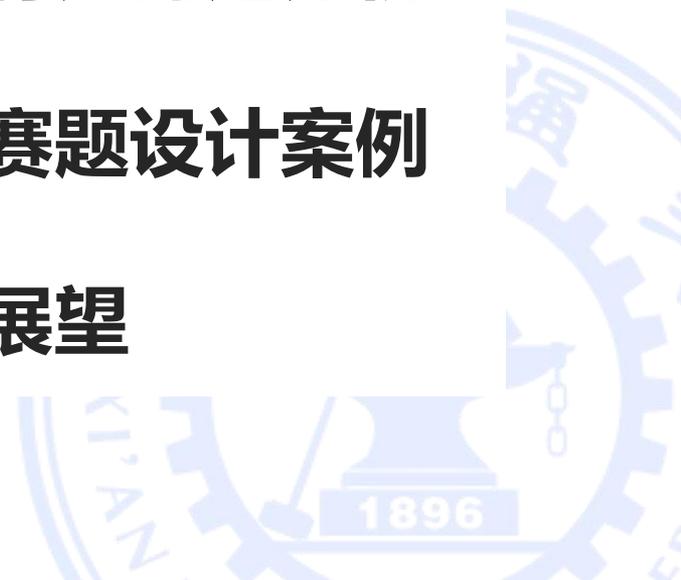
2017年3月



CONTENS



- 一、弱信号处理类赛题回顾**
- 二、弱信号处理系统结构**
- 三、弱信号处理有关问题分析**
- 四、弱信号处理赛题设计案例**
- 五、弱信号处理展望**



弱信号处理题目回顾

1999

测量放大器

集成运放参数测试仪

2005

2007

程控滤波器

声音引导系统

2009

2010

点光源跟踪系统

简易电子秤

2012

2012

弱信号检测装置

声音定位系统

2012

2013

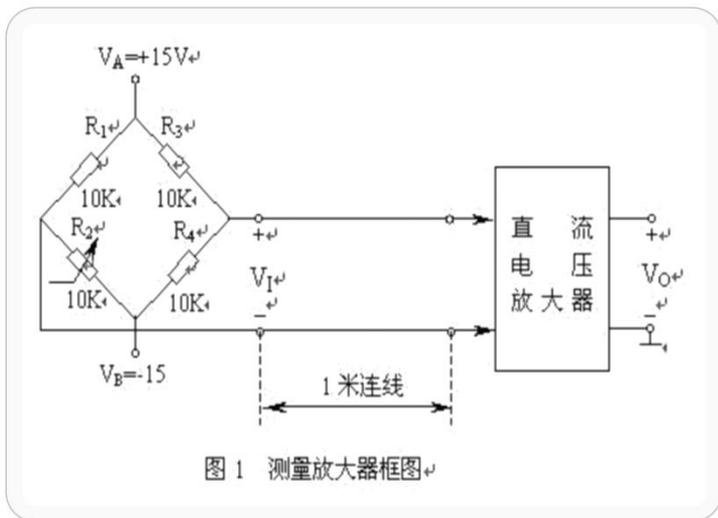
手写绘图板，红外通信

锁定放大器的设计

2014

2016

简易电子秤

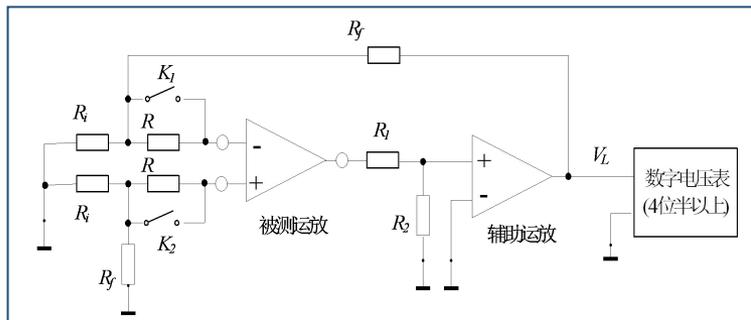


基本要求:

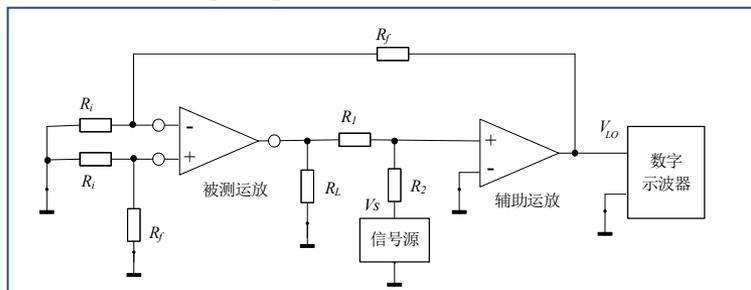
- a、差模电压放大倍数 $AVD = 1 \sim 500$ ，可手动调节；
- b、最大输出电压为 $\pm 10V$ ，非线性误差 $< 0.5\%$ ；
- c、共模电压 $+7.5V \sim -7.5V$ ， $KCMR > 105$ ；
- d、在 $AVD = 500$ 时，输出噪声电压的峰 - 峰值小于 $1V$ ；
- e、通频带 $0 \sim 10Hz$ ；
- f、直流电压放大器的差模输入电阻 $\geq 2M\Omega$

发挥部分:

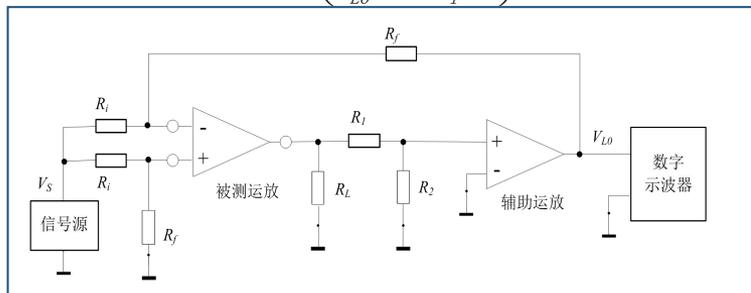
- (1) 提高差模电压放大倍数至 $AVD = 1000$ ，同时减小输出端噪声电压。
- (2) 将通频带展宽为 $0 \sim 100Hz$ 以上。
- (3) 提高电路的共模抑制比。
- (4) 差模电压放大倍数 AVD 可预置并显示，预置范围 $1 \sim 1000$ ，步距为 1 。



$$V_{IO} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \cdot V_{LO} \quad I_{IO} = \frac{R_i}{R_i + R_f} \cdot \frac{V_{L1} - V_{LO}}{R}$$



$$A_{VD} = 20 \lg \left(\frac{V_S}{V_{LO}} \cdot \frac{R_i + R_f}{R_i} \right) \text{ (dB)}$$



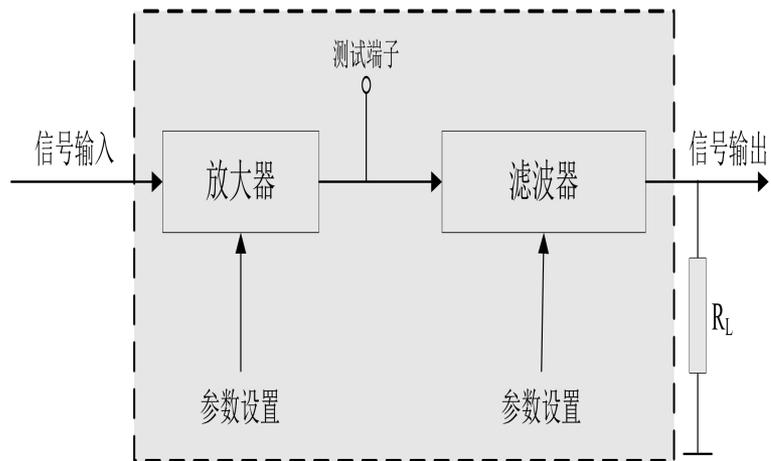
$$K_{CMR} = 20 \lg \left(\frac{V_S}{V_{LO}} \cdot \frac{R_i + R_f}{R_i} \right) \text{ (dB)}$$

基本要求:

- (1) 测试 V_{IO} 、 I_{IO} 、 AVD 和 K_{CMR} ，最大显示数为 3999；
- (2) V_{IO} ：0 ~ 40mV，误差绝对值小于3%读数+1个字；
 I_{IO} ：范围0 ~ 4μA，误差绝对值小于3%读数+1个字；
 AVD ：范围 60dB ~ 120dB，测试误差绝对值小于3dB；
 K_{CMR} ：范围 60dB ~ 120dB，测试误差小于3dB；
- (3) 测试仪中的信号源自制，频率为5Hz、输出电压4 V的正弦波，频率与电压值误差均小于1%；

发挥部分:

- (1) 增加GBW 测量，频率 100kHz ~ 3.5MHz，分辨力为 1kHz；
 制作一个扫频信号源，频率 40kHz ~ 4MHz，误差小于1%；
 输出电压 $2V \pm 0.2 V$ ；
- (2) 增加自动测量(含自动量程转换)功能。



基本要求

(1) 输入信号10mV，电压增益40dB，增益步进10dB，通频带100Hz~40kHz。

(2) 滤波器设为低通滤波器，-3dB截止频率 f_c 在1kHz~20kHz范围内可调，步进1kHz， $2f_c$ 处放大器与滤波器的总电压增益不大于30dB。

(3) 滤波器设为高通滤波器，其-3dB截止频率 f_c 在1kHz~20kHz范围内可调，步进为1kHz， $0.5f_c$ 处放大器与滤波器的总电压增益不大于30dB。

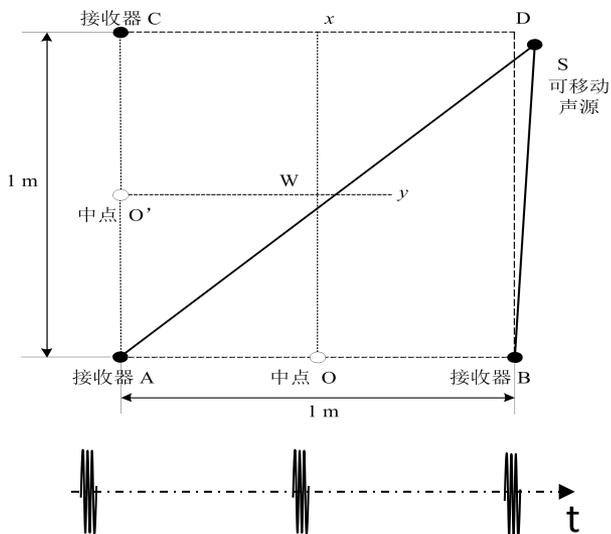
(4) 电压增益与截止频率的误差均不大于10%。

发挥部分

(1) 放大器增益60dB，输入信号10mV；增益10dB步进可调，电压增益误差不大于5%。

(2) 制作一个四阶椭圆型低通滤波器，带内起伏 ≤ 1 dB，-3dB通带为50kHz，要求放大器与低通滤波器在200kHz处的总电压增益小于5dB，-3dB通带误差不大于5%。

(3) 制作简易幅频特性测试仪，扫频出信号频率范围100Hz~200kHz，步进10kHz。



基本要求

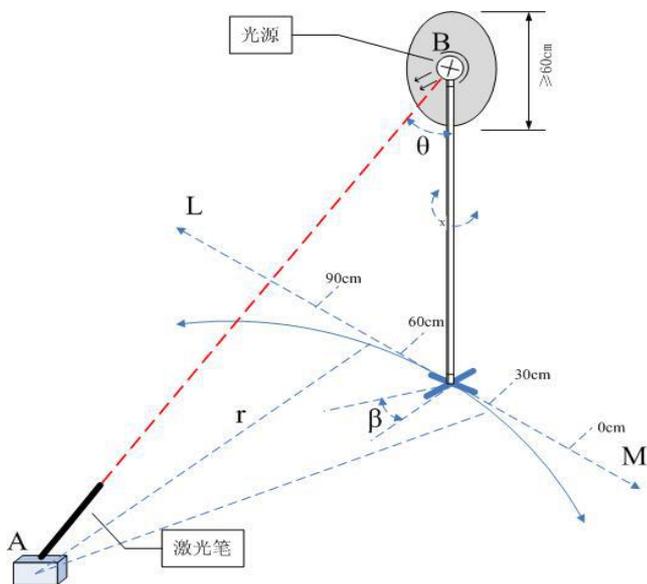
- (1) 可移动声源产生周期性音频脉冲信号，频率不限，周期不限。
- (2) 可移动声源发声后开始运动，到达Ox线停止，这段运动时间为响应时间，计算出响应的平均速度要求大于 5cm/s。
- (3) 可移动声源停止后的位置与Ox线之间的距离为定位误差，定位误差小于3cm。
- (4) 可移动声源在运动过程中任意时刻超过Ox线左侧的距离小于5cm。

$$\text{平均速度} = \frac{\text{可移动声源的起始位置到Ox线的垂直距离}}{\text{响应时间}}$$

发挥部分

- (1) 将可移动声源转向180度，能够重复基本要求。
- (2) 平均速度大于10cm/s。定位误差小于1cm。
- (4) 可移动声源在运动过程中任意时刻超过Ox线左侧距离小于2cm。
- (5) 在完成基本要求部分移动到Ox线上后，可移动声源在原地停止5s ~ 10s，然后利用接收器A和C，使可移动声源运动到W点，到达W点以后，必须有明显的光和声指示并停止，此时声源距离W的直线距离小于1cm。整个运动过程的平均速度大于10cm/s。

$$\text{平均速度} = \frac{\text{可移动声源在Ox线上重新启动位置到移动停止点的直线距离}}{\text{再次运动时间}}$$



基本要求：

- (1) 系统中的指向激光笔可现场设置参数尽快指向点光源；
- (2) 激光笔光点调偏离点光源中心30cm时，能够尽快指向点光源；
- (3) 激光笔基本对准光源时，以A为圆心，将光源支架沿着圆周缓慢（10~15秒内）平稳移动20°（约60cm），激光笔能够连续跟踪指向LED点光源；

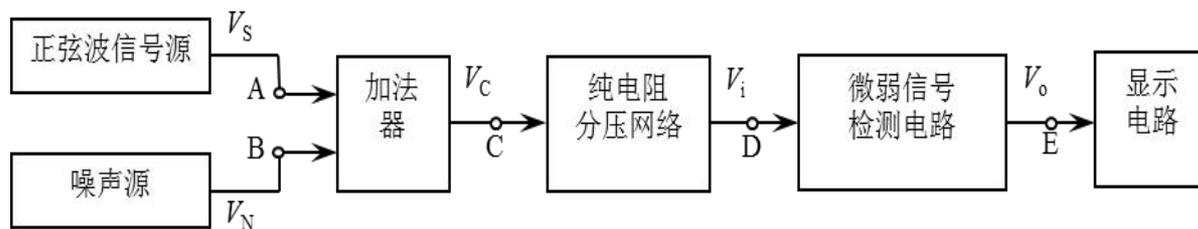
发挥部分

- (1) 在激光笔基本对准光源时，将光源支架沿着直线LM平稳缓慢（15秒内）移动60cm，激光笔能够连续跟踪指向光源。
- (2) 将光源支架旋转一个角度 β （ $\leq 20^\circ$ ），激光笔能够迅速指向光源。
- (3) 光源跟踪系统检测光源具有自适应性，改变点光源的亮度时（LED驱动电流变化 $\pm 50\text{mA}$ ），能够实现发挥部分（1）的内容；



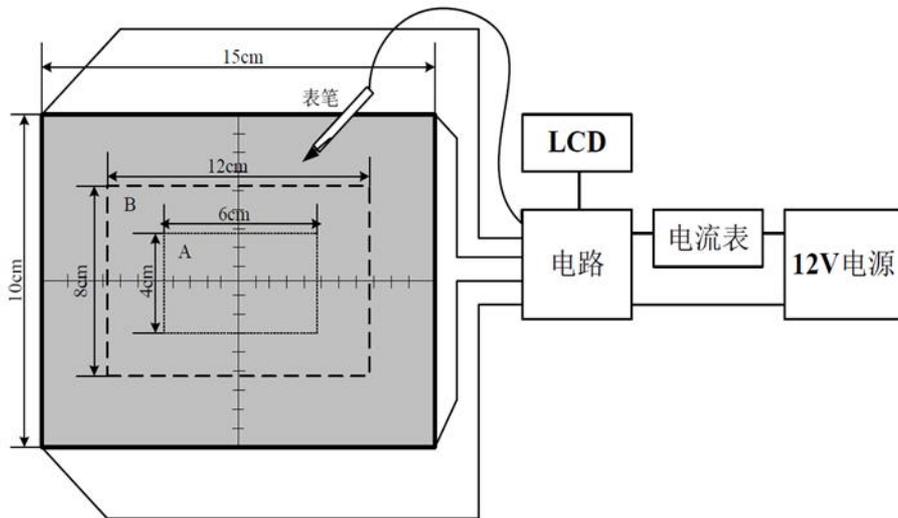
基本要求

- (1) 噪声 V_N 的均方根值为 $1V \pm 0.1V$ ；加法器输出 $V_C = V_S + V_N$ ，带宽大于1MHz；分压网络的衰减系数不低于100。
- (2) 微弱信号检测电路的输入阻抗 $R_i \geq 1 \text{ M}\Omega$ 。
- (3) 输入信号 V_S 频率为1 kHz、峰峰值200mV ~ 2V时，检测并显示正弦波信号的幅度值，误差5%。



发挥部分

- (1) 输入信号 V_S 峰峰值在20mV ~ 2V时，检测并显示正弦波信号的幅度值，误差5%。
- (2) 扩展被测信号 V_S 的频率范围，当信号的频率在500Hz ~ 2kHz范围内，检测并显示正弦波信号的幅度值，要求误差不超过5%。
- (3) 进一步提高检测精度，使检测误差不超过2%。



基本要求

- (1) 指示功能：表笔接触铜箔表面时，能给出明确显示。
- (2) 能正确显示触点位于纵坐标左右位置。
- (3) 能正确显示触点四象限位置。
- (4) 能正确显示坐标值。
- (5) 显示坐标值的分辨率为10mm，绝对误差不大于5mm。

发挥部分

- (1) 进一步提高坐标分辨率至8mm和6mm；要求分辨率为8mm时，绝对误差不大于4mm；分辨率为6mm时，绝对误差不大于3mm。
- (2) 绘图功能。能跟踪表笔动作，并显示绘图轨迹。在A区内画三个直径分别为20mm，12mm和8mm不同直径的圆，并显示该圆；20mm的圆要求能在10s内完成，其它圆不要求完成时间。
- (3) 低功耗设计。功耗为总电流乘12V；功耗越低得分越高。要求功耗等于或小于1.5W。

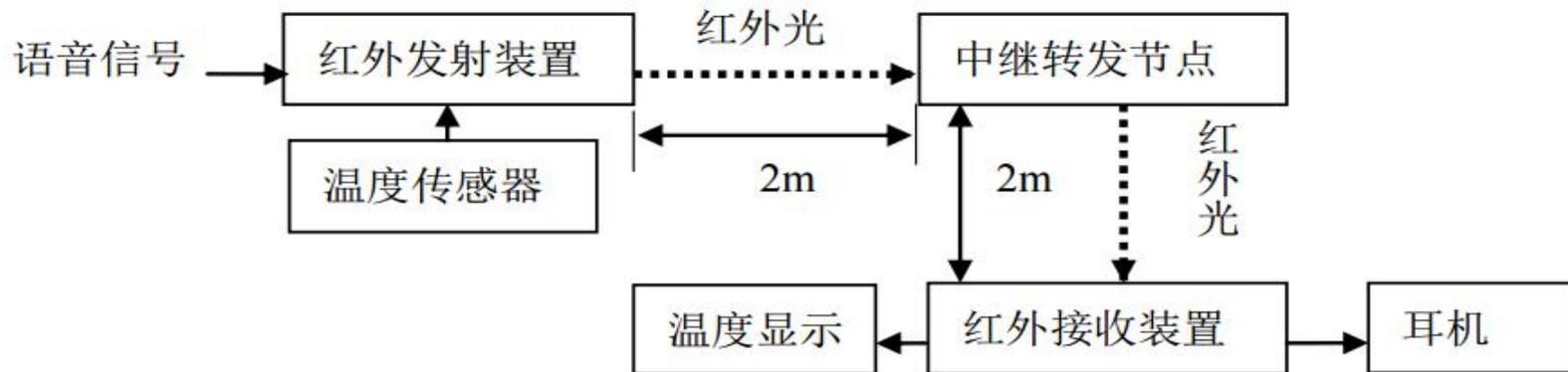


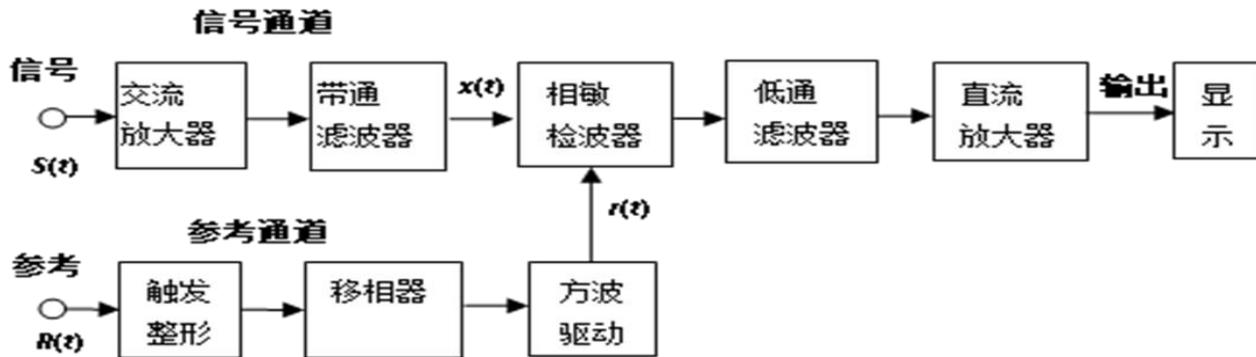
图2 红外光通信中继转发装置方框图

基本要求

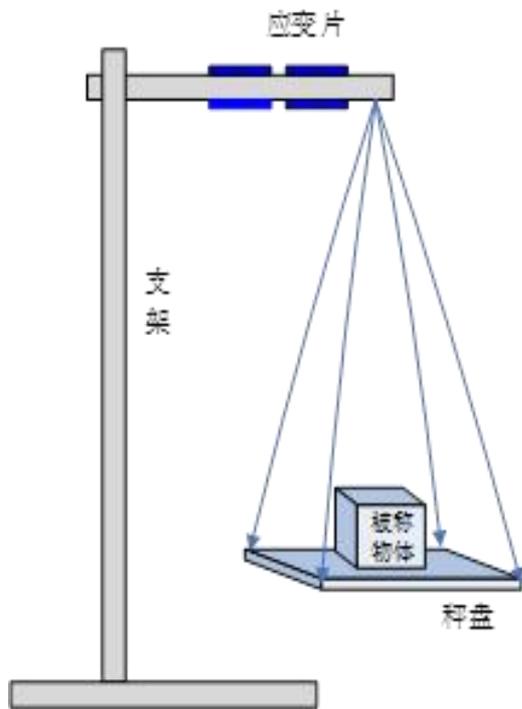
- (1) 通信距离2m。
- (2) 信号频率范围300~3400Hz。
- (3) 失真小，噪声低。

发挥部分

- (1) 增加数字通道
- (2) 中级转发2m
- (3) 低功耗设计。

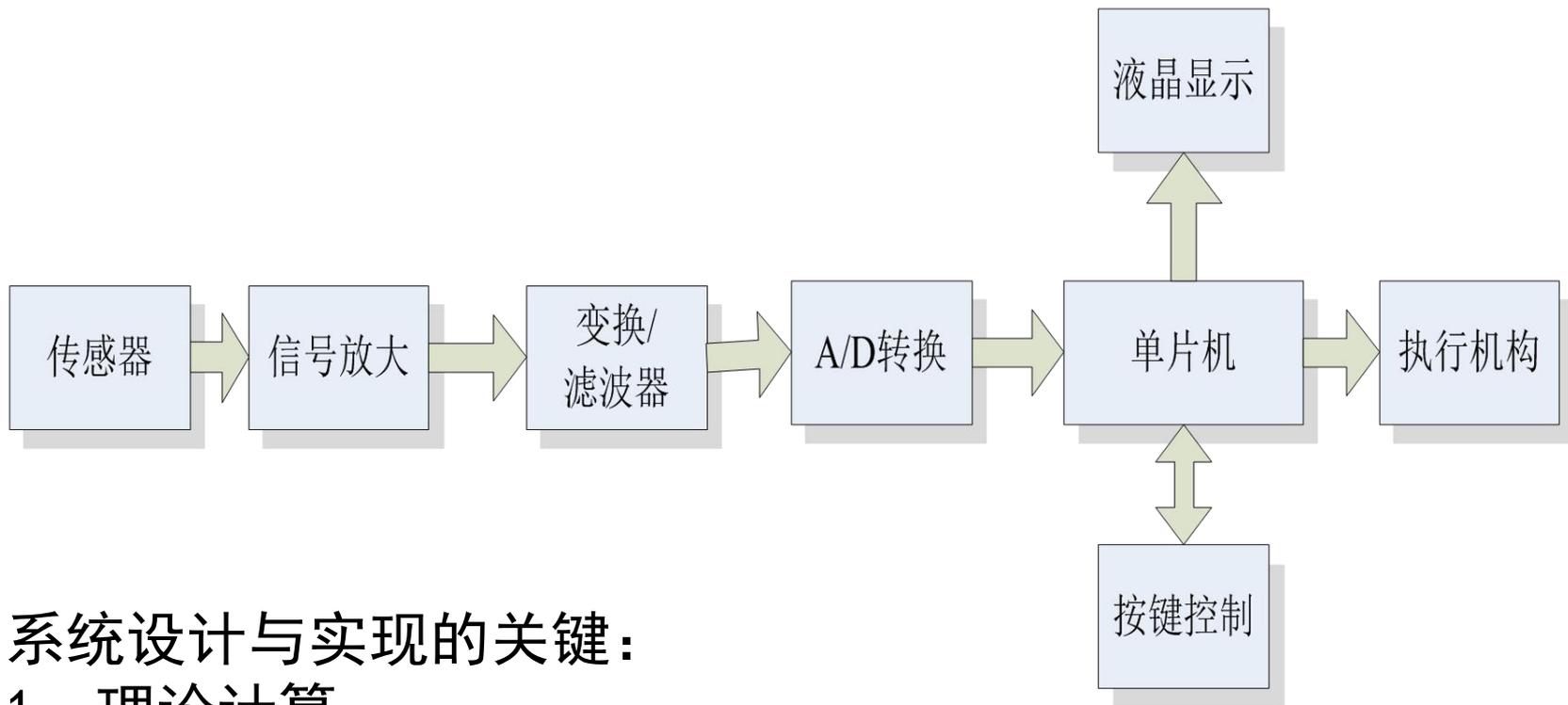


- (1) 参考信号频率为1kHz的正弦波信号，幅度自定。R(t)通过分压为S(t)幅度有效值为 $10\mu\text{V} \sim 1\text{mV}$ 。
- (2) 参考通道输出方波r(t)，r(t)的相位相对R(t)可移相180度，步进小于10度。
- (3) 信号通道的3dB频带范围为900Hz~1100Hz。误差小于20%。
- (4) 测量显示被测信号S(t)幅度有效值，误差小于10%。
- (5) 在锁定放大器输入端增加加法器，实现S(t)与n(t)的1:1叠加。
- (6) 用另一信号源产生一个频率为1050~2100Hz的正弦波信号作为n(t)，信号幅度等于S(t)。n(t)亦可由与获得S(t)同样结构的电阻分压网络得到。锁定放大器应尽量降低n(t)对S(t)信号有效值测量的影响，测量误差小于10%。
- (7) 增加n(t)幅度，使之等于10S(t)，锁定放大器对S(t)信号有效值的测量误差小于10%。



要求:

- (1) 电子秤可以数字显示被称物体的重量，单位克(g)；(10分)
- (2) 电子秤称重范围5.00g~500g；重量小于50g，称重误差小于0.5g；重量在50g及以上，称重误差小于1g；(50分)
- (3) 电子秤可以设置单价(元/克)，可计算物品金额并实现金额累加；(15分)
- (4) 电子秤具有去皮功能，去皮范围不超过100g；



系统设计与实现的关键：

- 1、理论计算
- 2、细节实现
- 3、制作经验
- 4、器件比手艺重要



1、传感器与信号质量

信号源是提高信号质量的关键，好的信号质量可以减轻后续电路的压力和提高检测精度。

例如：2012年、2016年“简易电子秤”中的应变片、悬臂梁、桥路

2011年“红外通信”中的红外收发管

2009年“声音引导”和2012年“声音定位”中的喇叭和谐振腔

2013年的“手写绘图板”中的电阻两端的电压

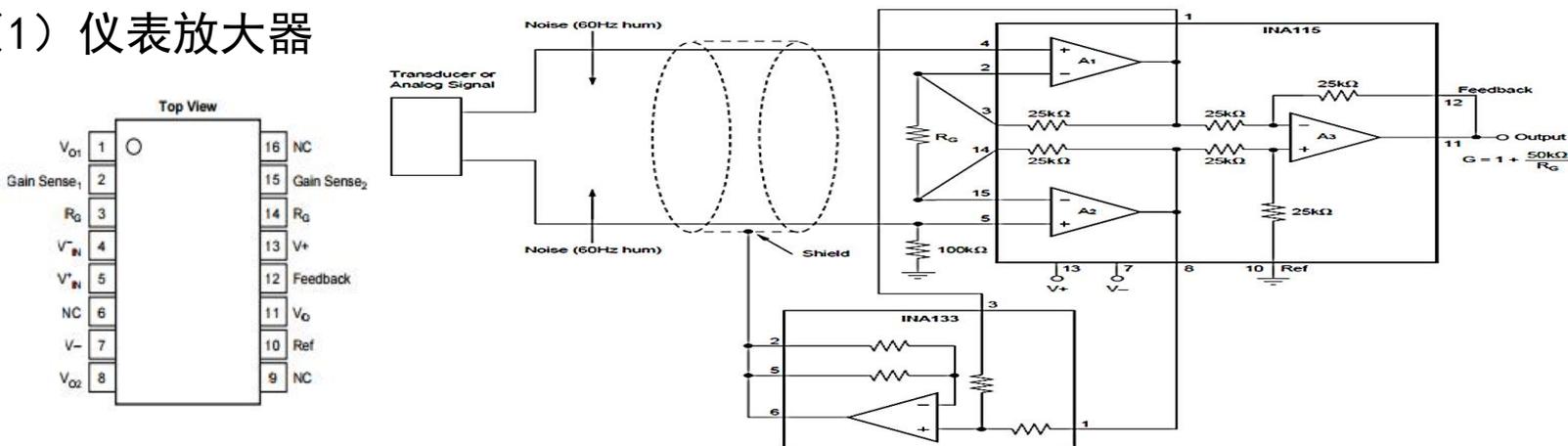
2010年的“点光源跟踪系统”中的光电发射和接受管



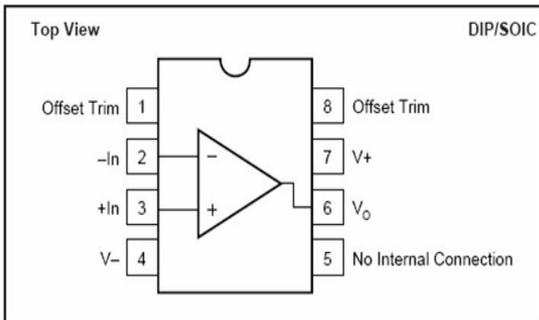


2、放大电路与放大器件

(1) 仪表放大器



(2) 高精度放大器



PARAMETER	CONDITION	OPA177F			OPA177G			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE Input Offset Voltage Long-Term Input Offset ⁽¹⁾ Voltage Stability Offset Adjustment Range Power Supply Rejection Ratio	$R_G = 20k\Omega$ $V_S = \pm 3V$ to $\pm 18V$		10	25		20	60	μV
			0.3		0.4			$\mu V/Mo$
			± 3		*			mV
			125		120			dB
			115		110			
INPUT BIAS CURRENT Input Offset Current Input Bias Current			0.3	1.5	*	2.8	nA	
			0.5	± 2	*	± 2.8	nA	
NOISE Input Noise Voltage Input Noise Current	1Hz to 100Hz ⁽²⁾ 1Hz to 100Hz		85	150	*	*	nVrms	
			4.5		*	*	pArms	
INPUT IMPEDANCE Input Resistance	Differential Mode ⁽³⁾ Common-Mode		26	45	18.5	*	M Ω	
				200	*	*	G Ω	
INPUT VOLTAGE RANGE Common-Mode Input Range ⁽⁴⁾ Common-Mode Rejection	$V_{CM} = \pm 13V$		± 13	± 14	*	*	V	
			130	140	115	*	*	dB
OPEN-LOOP GAIN Large Signal Voltage Gain	$R_L \geq 2k\Omega$ $V_O = \pm 10V$ ⁽⁵⁾		5110	12,000	2000	6000	V/mV	
OUTPUT Output Voltage Swing	$R_L \geq 10k\Omega$ $R_L \geq 2k\Omega$ $R_L \geq 1k\Omega$		± 13.5	± 14	*	*	V	
			± 12.5	± 13	*	*	V	
			± 12	± 12.5	*	*	V	
				60	*	*	Ω	
Open-Loop Output Resistance								
FREQUENCY RESPONSE Slew Rate Closed-Loop Bandwidth	$R_L \geq 2k\Omega$ $G = +1$		0.1	0.3	*	*	V/ μs	
			0.4	0.6	*	*	MHz	



3、单电源供电

(1) 单电源交流放大器

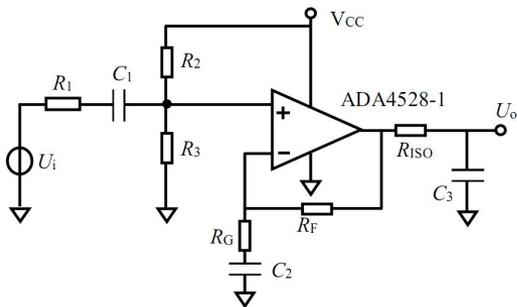


图 5-1a 交流耦合单电源单入单出同相线性变换电路

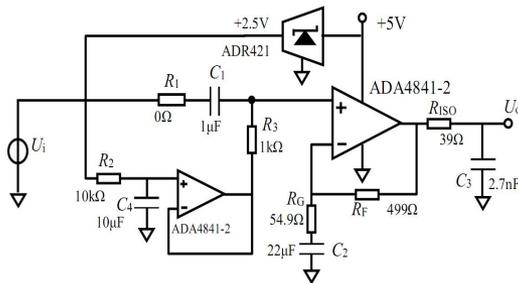


图 5-1b 交流耦合单电源单入单出同相线性变换电路低噪声版

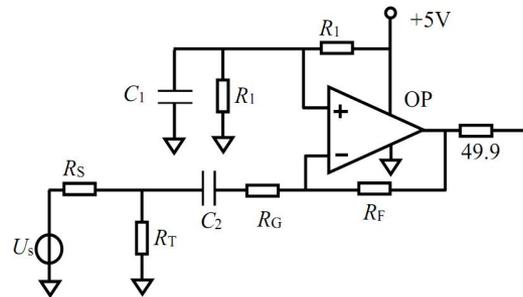


图 5-2 交流耦合单电源单入单出反相线性变换电路

(2) 单电源直流放大器

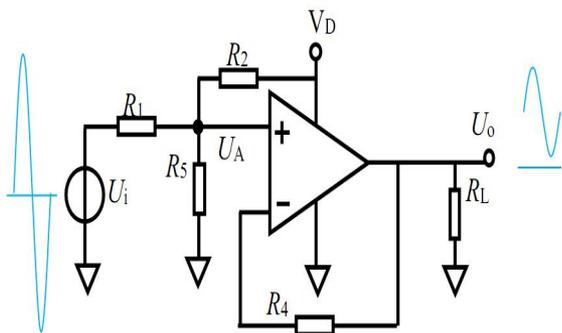


图 5-4 直接耦合单电源提升式同相, $G \leq 0.5$

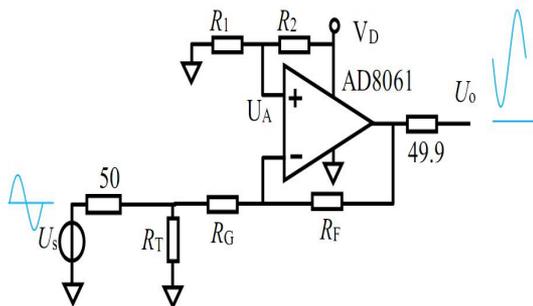


图 5-5 直接耦合单电源提升式反相

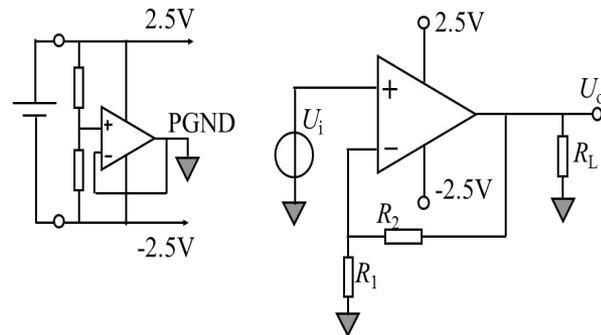


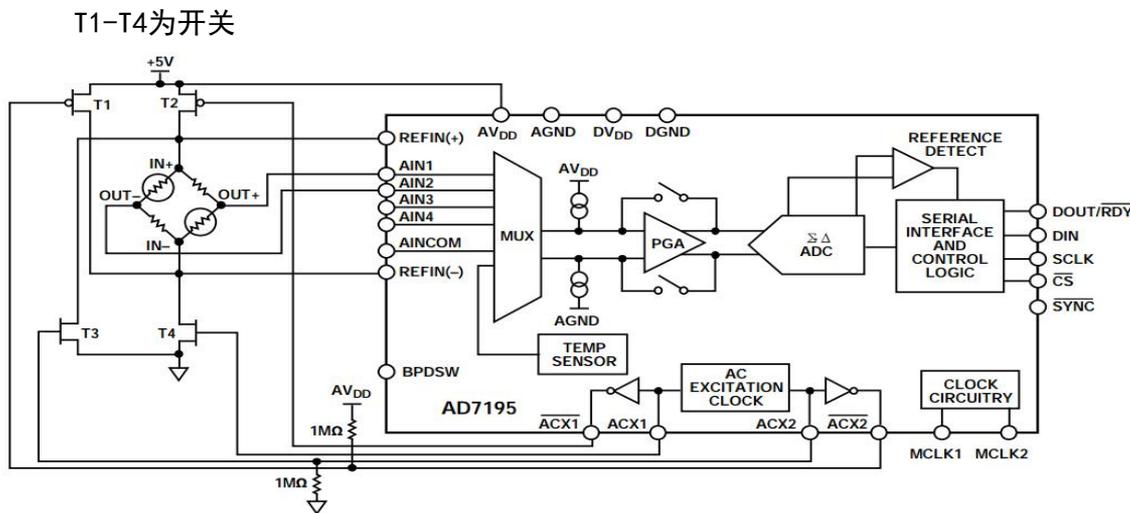
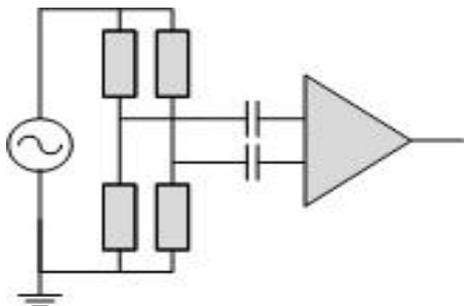
图7-1-3单电源供电形成的伪地型放大器

单电源单极性信号直接同相放大就可以，运放必须是IO轨至轨



4、零点漂移问题

(1) 交流源驱动



(2) 直流自稳零放大器或零漂移放大器

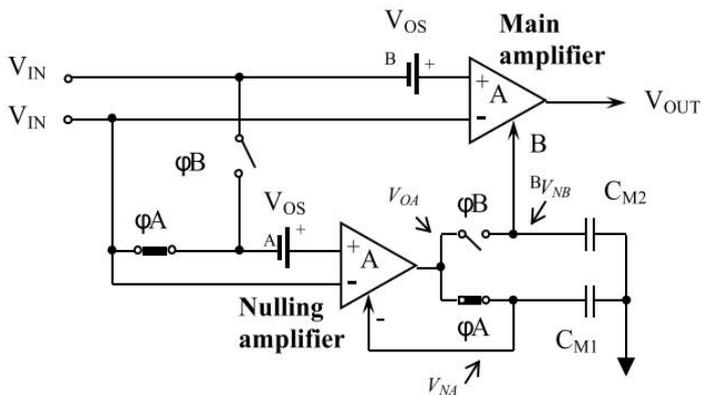


图50. 典型应用(电子秤)

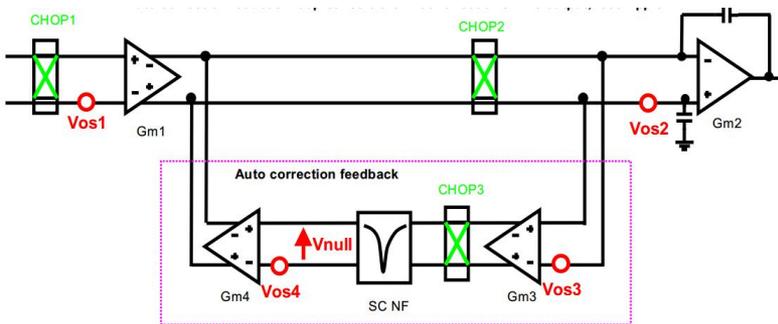


图3. 斩波方案

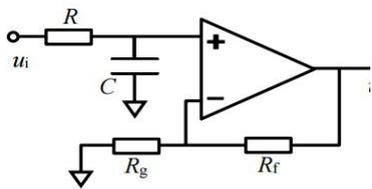
在时钟阶段A中，开关 ϕ_A 闭合，开关 ϕ_B 断开，清零放大器的失调电压经过测量后，储存在电容 C_{M1} 上，并对清零放大器清零。在时钟阶段B中，开关 ϕ_B 闭合，开关 ϕ_A 断开，主放大器的失调电压经过测量后，储存在电容 C_{M2} 上并清零。

CHOP1和CHOP2将来自 G_{m1} 的初始失调和 $1/f$ 噪声调制到斩波频率。跨导放大器 G_{m3} 检测CHOP2输出端的调制纹波，斩波网络CHOP3将该纹波解调回DC

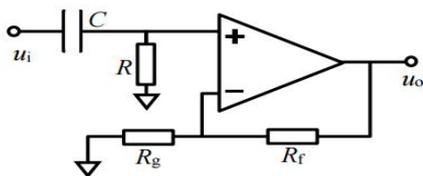


5、信号滤波问题

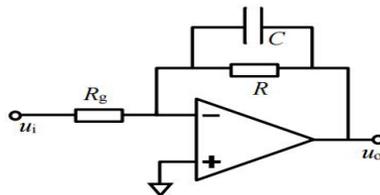
(1) 对于直流和低频信号的滤波可以分散到各级。



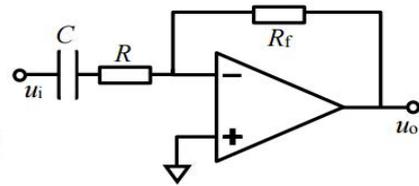
(a) 一阶同相低通滤波器



(b) 一阶同相高通滤波器



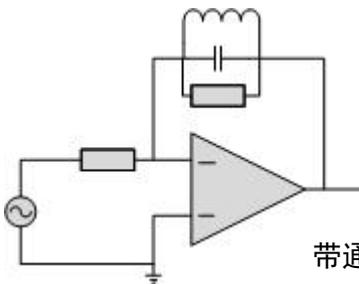
(a) 一阶反相低通滤波器



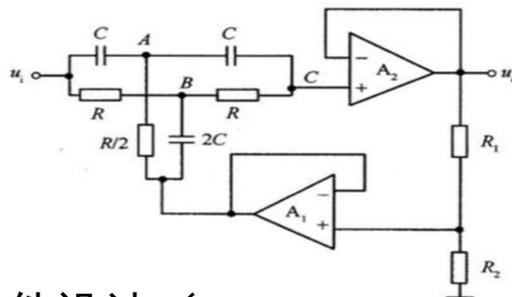
(b) 一阶反相高通滤波器

(2) 对于低频和直流可以采用单片机数字滤波

(3) 特定要求下的简单易用的滤波器

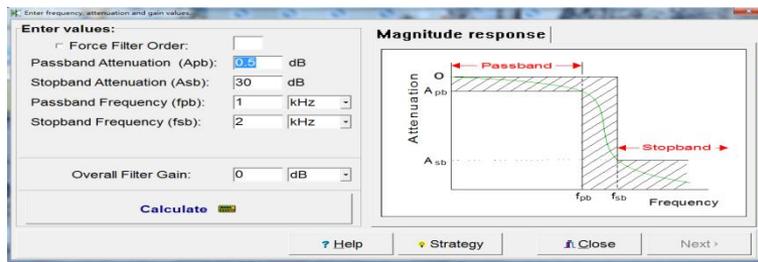
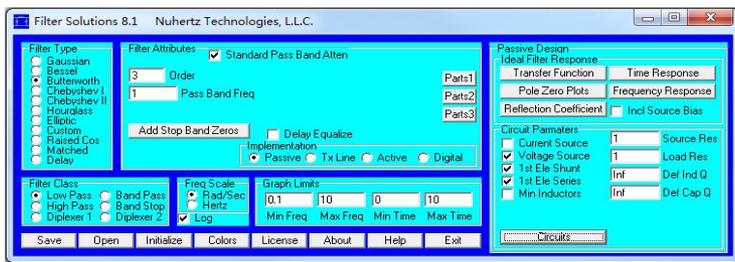


带通滤波器



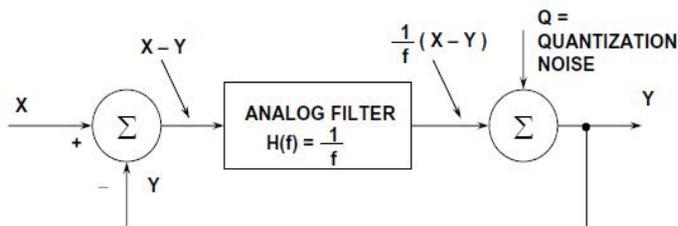
有源双T带阻滤波器

(4) 比较复杂的高阶滤波器使用软件设计 (filter solution, filter wiz pro)





6、高精度模数转换电路与器件



$$Y = \frac{1}{f}(X - Y) + Q$$

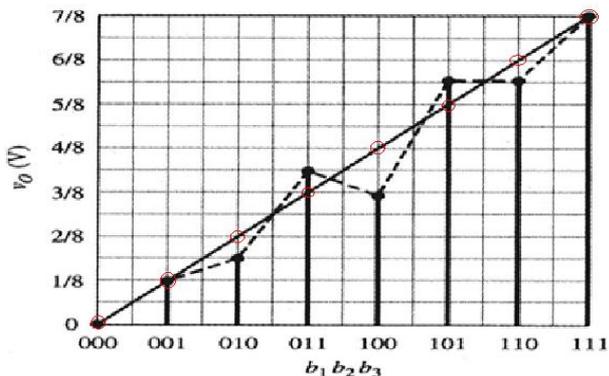
REARRANGING, SOLVING FOR Y:

$$Y = \frac{X}{f+1} + \frac{Qf}{f+1}$$

SIGNAL TERM NOISE TERM

图6: Σ - Δ 型调制器的简化频域线性化模型

- 1、精度与驱动密切相关
- 2、高位数可以减轻放大器的压力，最好自带PGA
- 3、选择器件时注意非线性和丢失码
- 4、尽量采用内参考电压
- 5、精度与输出速率、数字滤波器有关
- 6、处理好数字地、模拟地
- 7、尽量采用差分输入
- 8、参考电压与放大器参考、电桥驱动统一
- 9、有些器件要足够散热和热焊盘



k	000	001	010	011	100	101	110	111
INL_k	0	0	-1/2	1/2	-1	1/2	-1/2	0
DNL_k	0	0	-1/2	1	-3/2	3/2	-1	1/2
$INL=1LSB; DNL=3/2$								



7、信号检波的问题

(1) 相敏检波

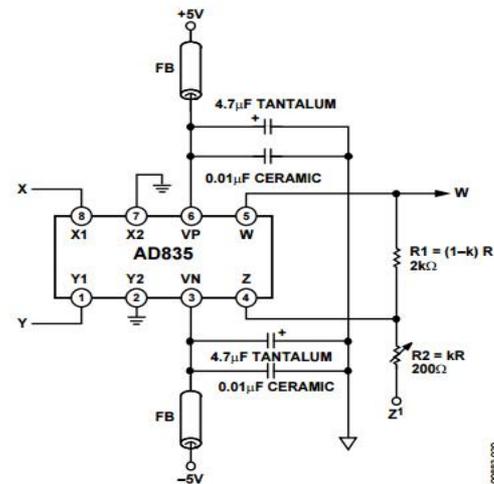
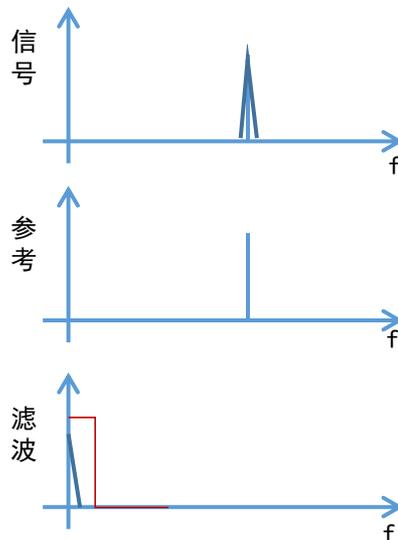
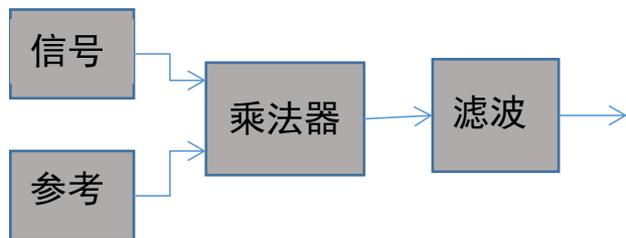
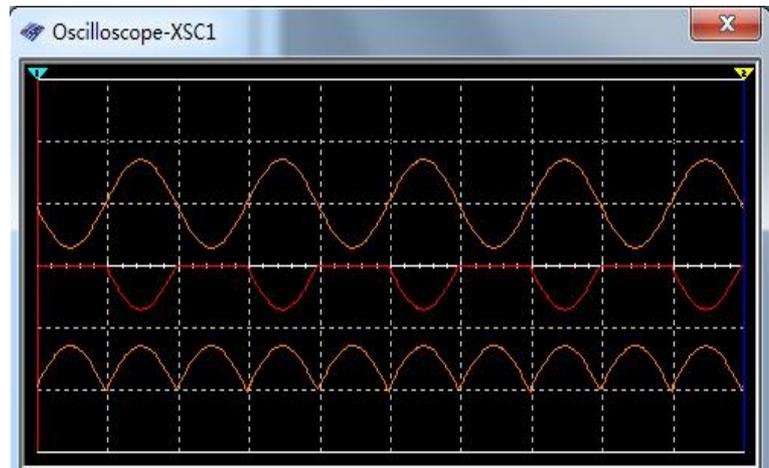
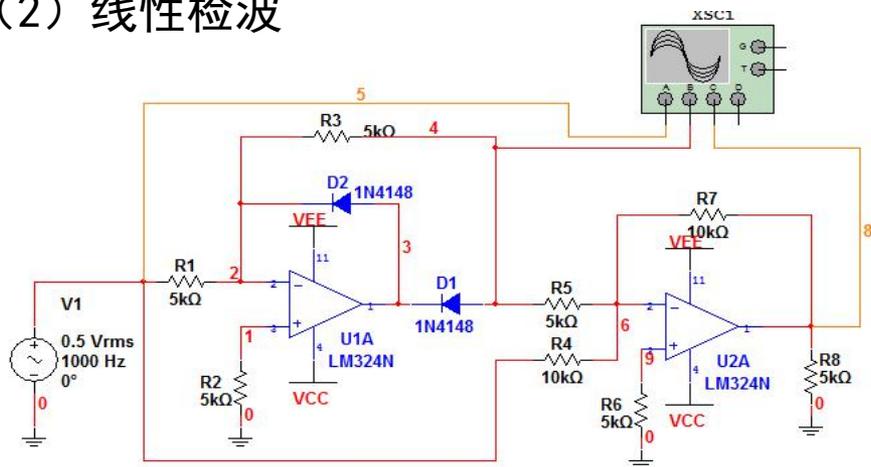
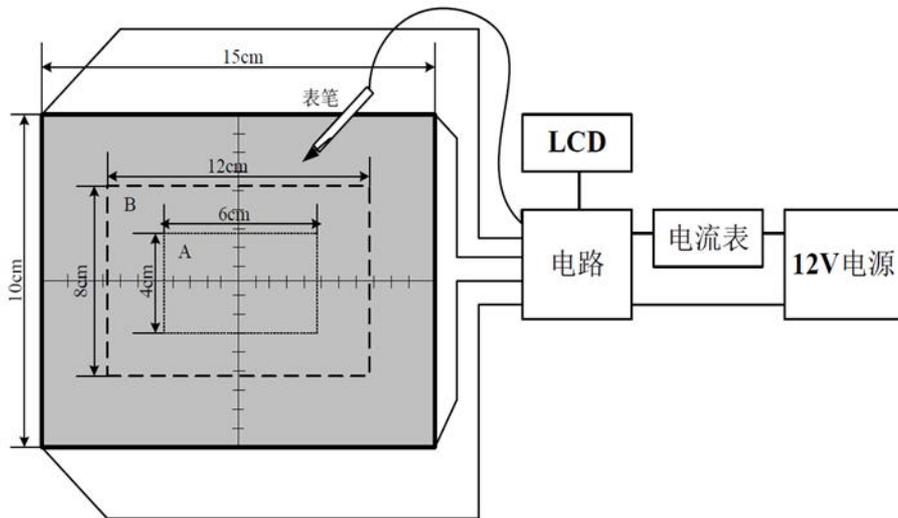


Figure 20. Multiplier Connections

(2) 线性检波





基本要求

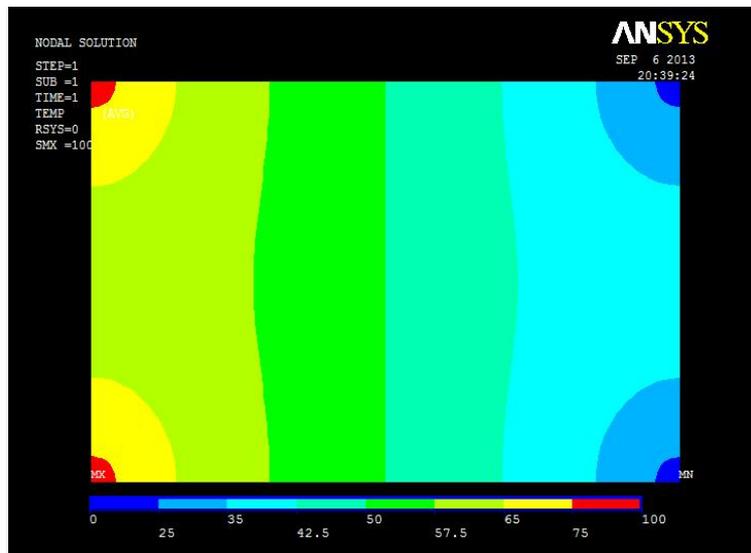
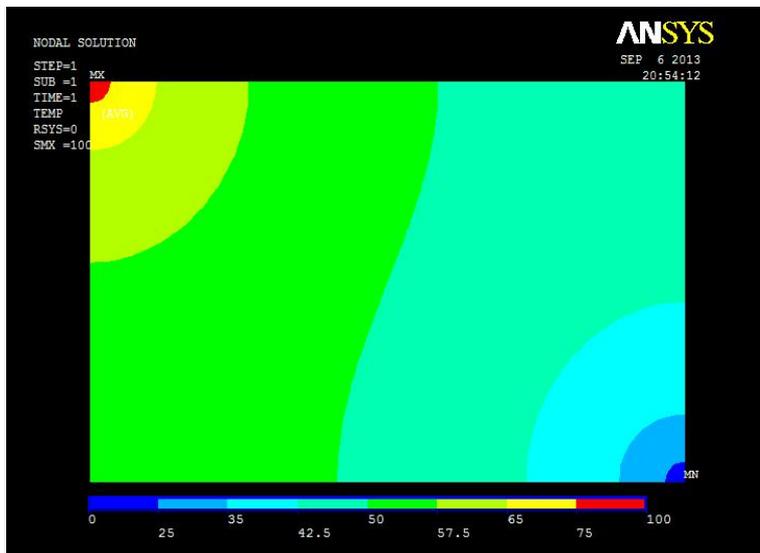
- (1) 指示功能：表笔接触铜箔表面时，能给出明确显示。
- (2) 能正确显示触点位于纵坐标左右位置。
- (3) 能正确显示触点四象限位置。
- (4) 能正确显示坐标值。
- (5) 显示坐标值的分辨率为10mm，绝对误差不大于5mm。

发挥部分

- (1) 进一步提高坐标分辨率至8mm和6mm；要求分辨率为8mm时，绝对误差不大于4mm；分辨率为6mm时，绝对误差不大于3mm。
- (2) 绘图功能。能跟踪表笔动作，并显示绘图轨迹。在A区内画三个直径分别为20mm，12mm和8mm不同直径的圆，并显示该圆；20mm的圆要求能在10s内完成，其它圆不要求完成时间。
- (3) 低功耗设计。功耗为总电流乘12V；功耗越低得分越高。要求功耗等于或小于1.5W。



- 1、用覆铜板实现手写版以电阻测量为依据。
- 2、用6位半的万用表实测覆铜板的电阻最大约为5mΩ。
- 3、用有限元仿真软件对覆铜板的电场分布进行了仿真。
- 4、对角加电时电场分布不均匀，非线性比较严重，给后续校正带来困难，但接线简单。
- 5、对边接线电场分布在高精度区域比较均匀，但接线较麻烦。
- 6、对边接线时，边线中间位置电场分布不均匀，但影响不大。





- 1、驱动源采用恒流源，减少MOS开关切换、导线电阻的影响。
- 2、驱动源采用交流信号，减少放大器直流漂移的影响。
- 3、驱动源波形为正弦波，便于后续相关性处理，减少噪声的影响。
- 4、驱动电源频率选133.3Hz，避开工频的整数倍，减少工频干扰。
- 4、为了提高检测电压，驱动电流在1A以上。
- 5、放大器采用两路仪表放大器，分别放大对边总信号电压和表笔电压，通过计算可以剔除电源、开关、导线的影响。
- 6、两个放大器的输入阻抗很高，不影响边线电场，接线位置固定

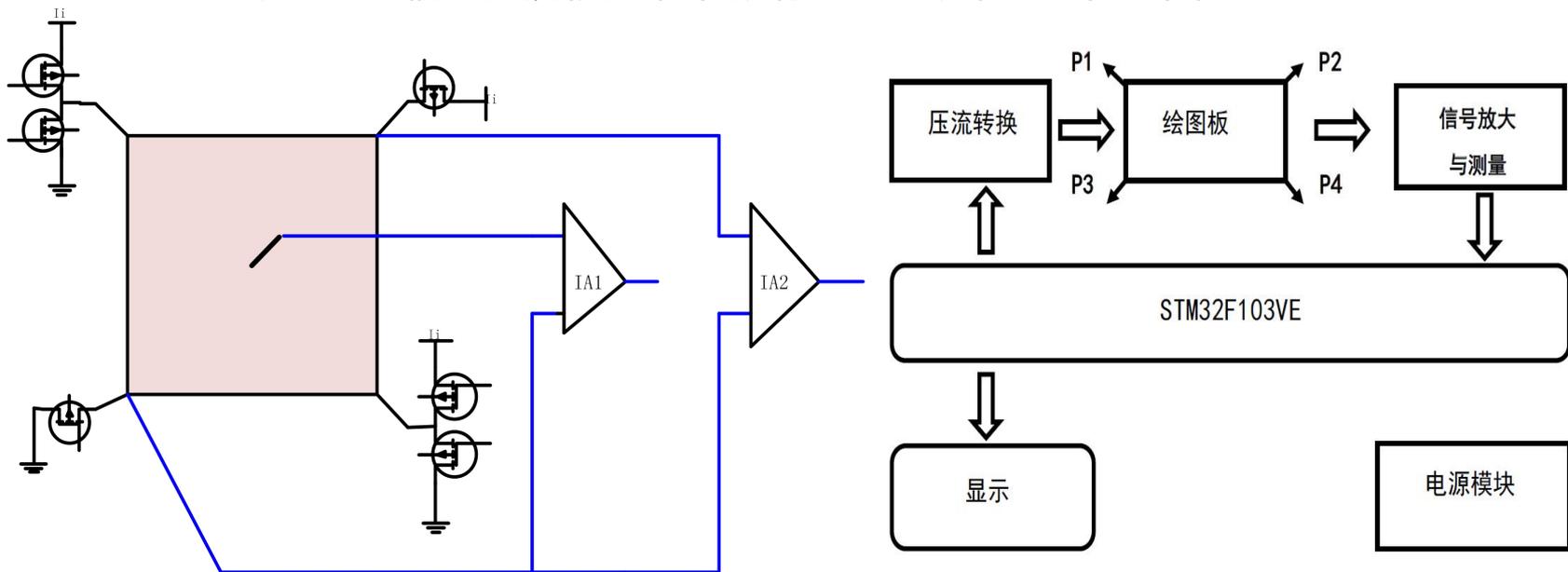


图 1.4 系统结构框图



- 1、驱动信号由单片机产生，电路简单，更重要的相关性计算采用数字式处理。
- 2、ADC采用两路24bit的 $\Sigma\Delta$ ADC—AD7176-2，有效位数达到21bit。
- 3、为了获得大的恒流电流，而且能降低功耗，采用运放制作恒流源，大变比的变压器降压扩流。采用互感器额定电流比 $K=50A/50mA$ ，最终获得电流1.335A。
- 4、开关使用普通的MOS管即可。

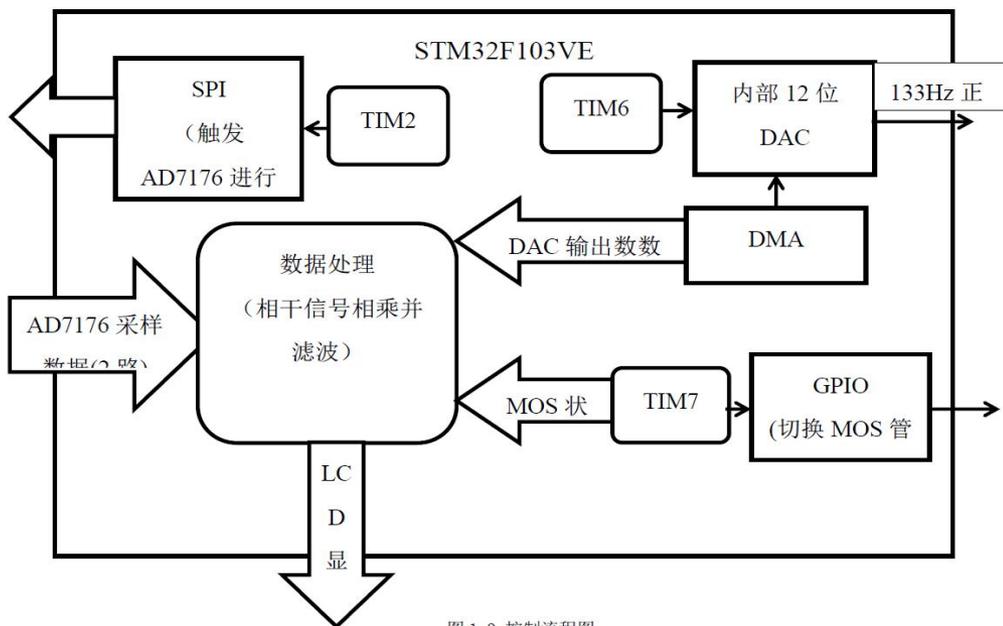
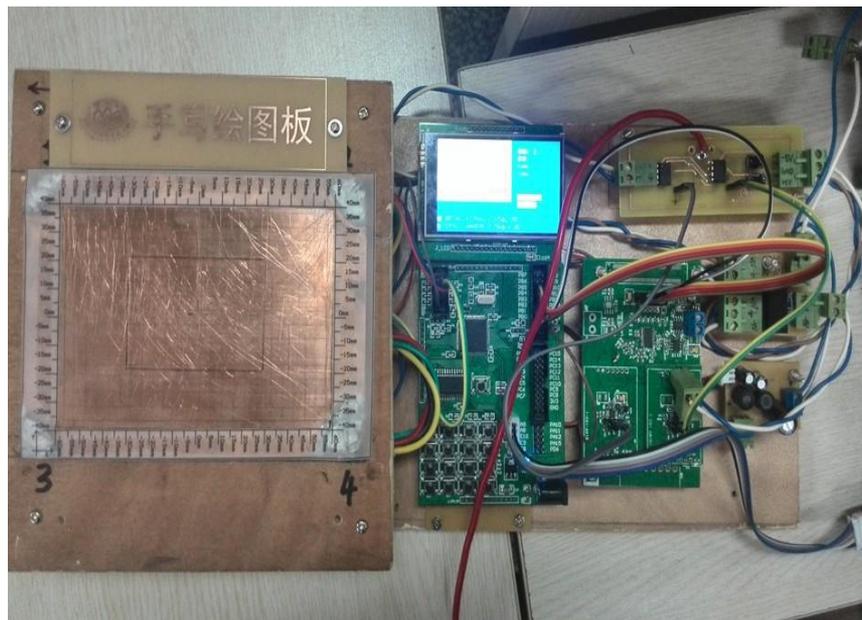
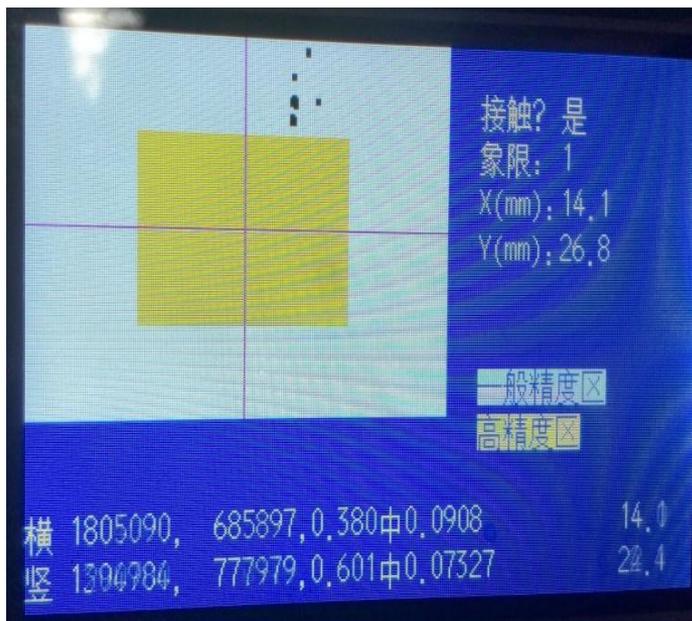


图 1.3 控制流程图



- 1、经过现场测试，结果达到了题目的要求
- 2、缺点是曲线不够平滑





设计要求：

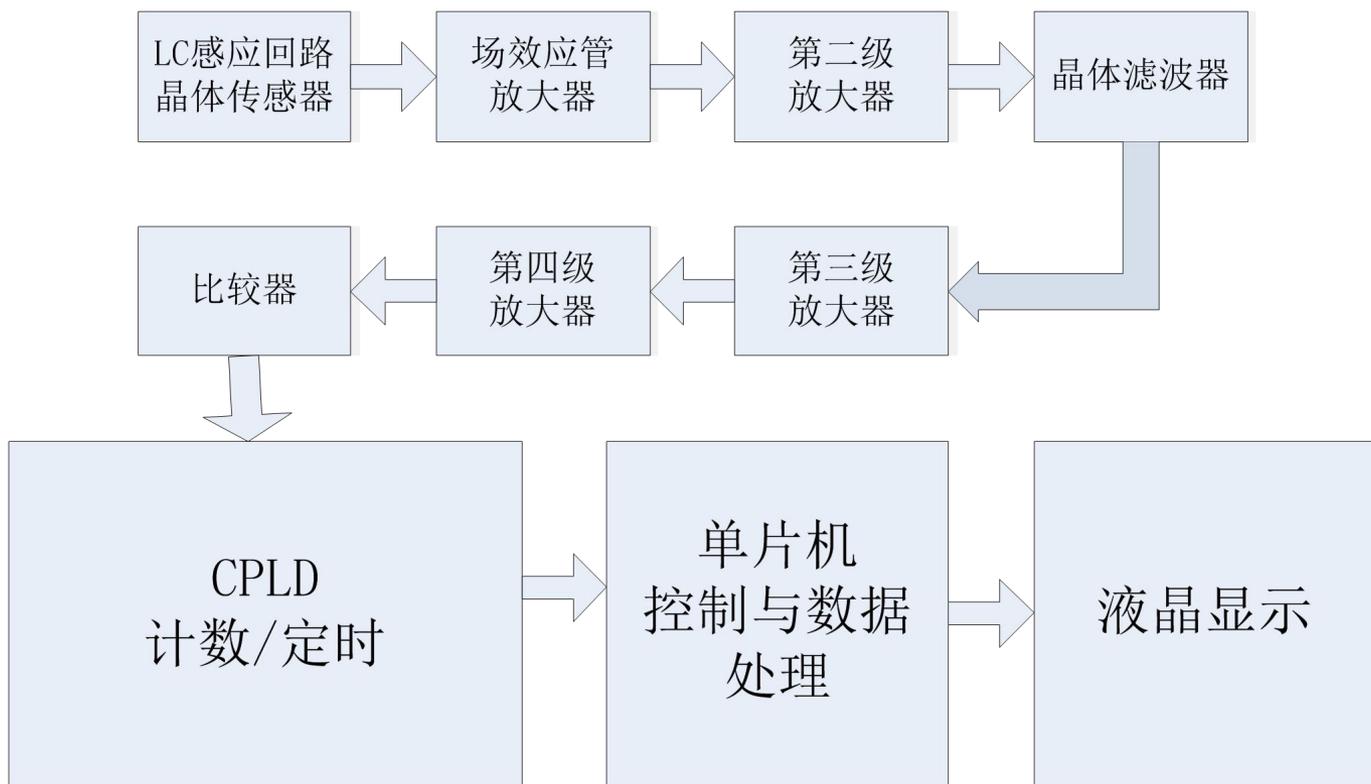
- 1、设计一种能够检测石英手表、电手表、机械手表走时误差的手表精度检测仪
 - 2、检测精度0.01ppm。
 - 3、所有手表在检测时不能打开手表、检测仪，不能连接任何导线。
 - 4、使用方便快捷
- (2008年开放式竞赛，该题目来源于企业项目要求)





系统组成：

由信号获取、放大、滤波、比较、测频、数据处理、显示等组成

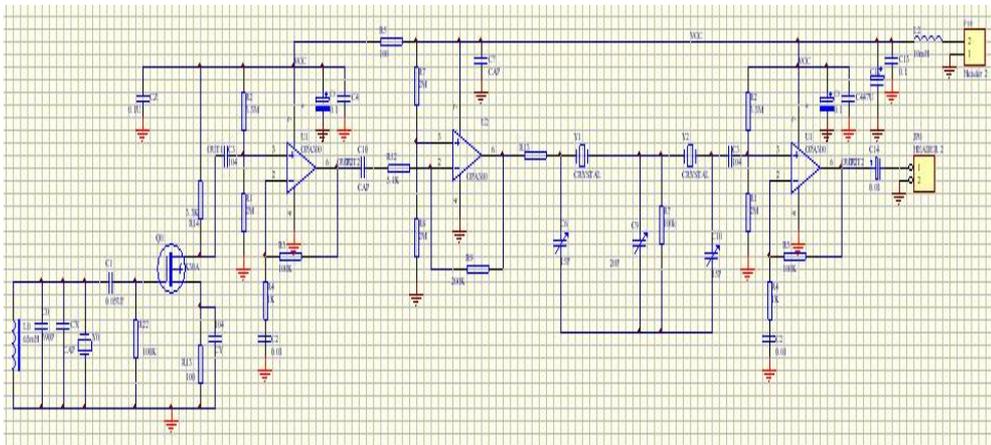


系统结构图



放大器设计：

- 1、石英表以晶体为传感器；电子手表以感应线圈为传感器、机械表以麦克风为传感器。本次以石英表为主。
- 2、由于信号幅度非常小，总的放大倍数在10万倍以上。
- 3、放大器选用宽带、低噪声、高精度运放OPA300和JFET管。
- 4、滤波采用晶体滤波器。
- 5、电源滤波、印制板布局布线、屏蔽至关重要。





频率测量：

1、测量手表走时的精确度，测量精度在0.01ppm($1\text{ppm}=10^{-6}$)，手表的时钟频率为32768Hz。

2、如果使用直接测量法则需要测到：

$$32768 \text{ Hz} \times 10^{-6}\% = 0.00032768 \text{ Hz}$$

3、频率计的显示结果：

32768.00000000Hz，需要计数器的位数13位十进制计数器。

4、所需要的测量时间：

1Hz需要1s，0.1Hz需要10s.....，在此需要 10^8s ，约277777小时=1157天=3年

5、如果采用周期测量法，测量时间为一个周期时，则时标频率应为

$$32768 \times 10^8 \text{ Hz}$$

6、如果在32768个周期即1s测量，则时标频率应为 10^8Hz 。.....

7、采用多周期法可以解决此问题，测 10×32768 个周期，用时10s，10MHz时钟。



时钟处理：

- 1、时钟的精度直接影响测量精度
- 2、可以采用恒温晶体或温补晶体
- 3、设计中临时采取更高精度的频率计测量时钟的温度特性
- 4、由单片机最后对数据进行矫正





- 1、信号幅度越来越小，信噪比越来越差
- 2、信号频率越来越高，带宽也越宽
- 3、弱信号和控制电路、仪器仪表、通信等电路紧密结合
- 4、器件比手艺更重要，建立器件库，特殊器件解决特殊问题
- 5、做好指导教师先要做好学生，指导队伍建设是长期发展的根本
- 6、竞赛指导注意第三点：积累、理论、细节
- 7、竞赛培训以培养学生的能力为主，才能稳扎稳打
- 8、基本的动手能力以印制版设计、制作为中心进行
- 9、处理好工作—业绩---成果的关系，争取学校支持



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

谢谢！
请指正！

