

第 3 部分 综合研究性实验

实验 3.1 复合信号发生器

3.1.1 设计要求

用给定的运算放大器设计并制作一个复合信号发生器（选题于 2017 年全国大学生电子设计竞赛综合测评题，略有修改）。

设计制作要求如图 3.1.1 所示。设计制作一个方波产生器输出方波，再与三角波相叠加输出一个复合信号，再经滤波器后输出一个正弦波信号。

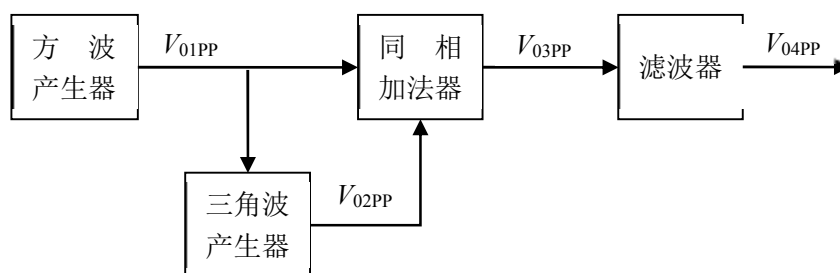


图 3.1.1 复合信号发生器框图

设计要求如下：

- （1）方波产生器输出方波信号参数要求： $V_{01PP}=4V\pm5\%$ ， $f=5KHz\pm100Hz$ ，波形无明显失真；
- （2）三角波产生器输出信号参数要求： $V_{02PP}=4V\pm5\%$ ， $f=5KHz\pm100Hz$ ，波形无明显失真；
- （3）同相加法器输出复合信号参数要求： $V_{03PP}=8V\pm5\%$ ， $f=5KHz\pm100Hz$ ，波形无明显失真；
- （4）滤波器输出正弦波信号参数要求： $V_{04PP}=4V\pm5\%$ ， $f=5KHz\pm100Hz$ ，波形无明显失真；
- （5）要求预留方波 V_{01PP} 、三角波 V_{02PP} 、同相加法器输出复合信号 V_{03PP} 、滤波器输出正弦波 V_{04PP} 的测试端子。
- （6）设计报告需给出方案设计、详细电路图、Multisim 仿真结果以及实物测试数据波形。

3.1.2 方波产生器设计

方波产生器输出方波信号参数要求： $V_{01PP}=4V\pm5\%$ ， $f=5KHz\pm100Hz$ 。

1、方案选择

555 定时器是一种多用途的数字-模拟混合集成电路，利用它能极方便地构成施密特触发器、单稳态触发器与多谐振荡器。由于使用灵活、方便，所以 555 定时器在波形的产生与交换、测量与控制、家用电器、电子玩具等许多领域中得到了应用。本设计要求可以用 555

集成芯片来产生方波。

集成运放广泛地应用于波形产生电路，第二章已经学习了基于两个运放的方波产生电路，这里重点推荐一种基于 RC 的单运放方波产生电路设计。

RC 振荡电路如图 3.1.2 所示，运放采用双电源供电，供电电压是 $\pm V_S$ ，电路的功能是振荡器，利用正反馈时运放饱和运行在正负电源电压 V_S 之间，下面简要定性分析该振荡器的工作原理。

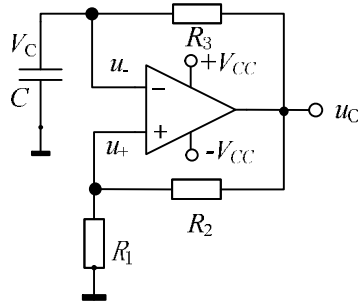


图 3.1.2 RC 振荡器电路

首先参考图 3.1.2 中 u_C 和 u_O 的波形对电路做定性分析。正如图 3.1.2 中所描绘的那样，设系统从松弛状态开始，因此电容电压 $u_C=0$ ，这样运放的反相端 $u_-=0V$ 。还假设开始输出处在正饱和区，换言之，输出为正电源电压 V_S 。由于输出反馈到同相输入端，所以有

$$u_+ = \frac{V_S R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.1.1)$$

这个在同相输入端的正电压将导致运放输入端口 (u_+ 和 u_- 之间) 有一个正电压差，结果是输出将不断被驱动到正饱和电压，即 V_S 。电容 C 开始通过电阻 R_3 充电至 V_S 。因为没有电流流进 u_- 端，因此充电的暂态过程与简单 RC 电路相同。

随着电容的充电，最终电容电压 u_C 会超过 $u_+ = V_S R_1 / (R_1 + R_2)$ ，结果使运放输入端口的有效电压 (即 u_+ 和 u_- 之间的电压) 变负。运算放大器放大了这个在输入端的负电压差，使在输出端输出更大的负电压。由于输出端的负电压通过 R_1 和 R_2 形成的分压器反馈到运放的同相输入端，同相输入端的电压变负，从而使运放输入端的压差更负，这又使输出电压进一步降低。这个反馈过程持续进行，直到输出达到负饱和电压 $-V_S$ 。在这一点，有

$$u_+ = -\frac{V_S R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.1.2)$$

因此，在瞬间输出达到了 $-V_S$ ，而 u_+ 跳变至 $-V_S R_1 / (R_1 + R_2)$ ，可以设电容电压仍为 $V_S R_1 / (R_1 + R_2)$ ，因为电容两端电压的变化要慢得多。

现在，由于电容电压 u_C 高于输出电压，电容开始通过 R_3 放电。当电容电压降低到低于 $-V_S R_1 / (R_1 + R_2)$ 时，电压 u 将低于 u_+ ，使运放输入端的压差为正，运放将这个正电压差放大为输出端的正电压，当将其再反馈到同相输入端时，会导致运放输入端有更大的正电压。不断的正反馈过程使运放输出达到正饱和。这样输出电压到达 V_S 。而 u_+ 端又变成如式 (3.1.3) 所

示。正如开始状态，电容电压现在低于输出，电容开始充电。这个周期不断重复，使运放输出产生方波。也就是说图 3.1.2 利用电容充放电改变运放反相输入端的电压，从而使比较器的输出状态发生改变，又使得运放同相输入端的电压（比较门限）发生改变，这样周而复始，在运放的输出端得到方波波形。图 3.1.2 所示电路输出波形以及运放反相输入端电压（也就是 u_c 电压）变化波形如图 3.1.3 所示。

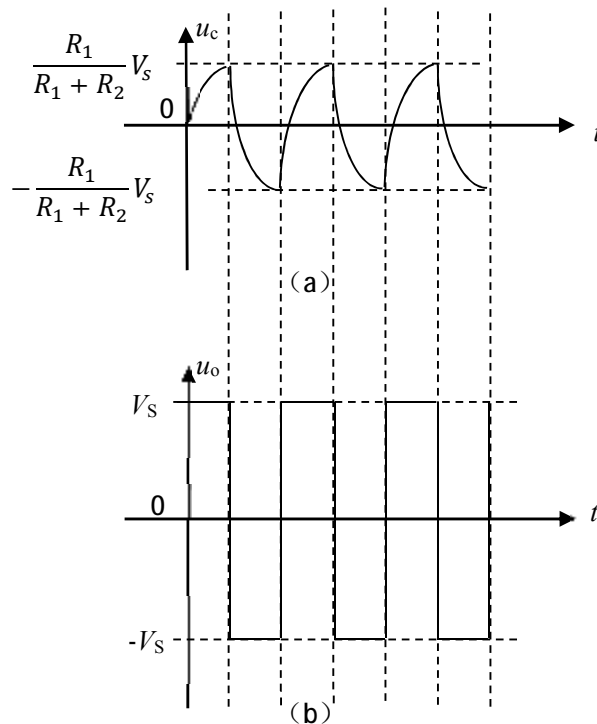


图 3.1.3 振荡器工作状况

下面推导图 3.1.2 所示振荡器的时间周期。设开始时刻 T_1 ， u_o 从 V_s 跳到 $-V_s$ ，如图 3.1.4 所示。已知 T_1 时， $u_o = V_s$ ，且根据分压关系可知， $u_+ = V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ 。另还已知 T_1 时， u_c 低于 u_+ ，电容电压在增加。

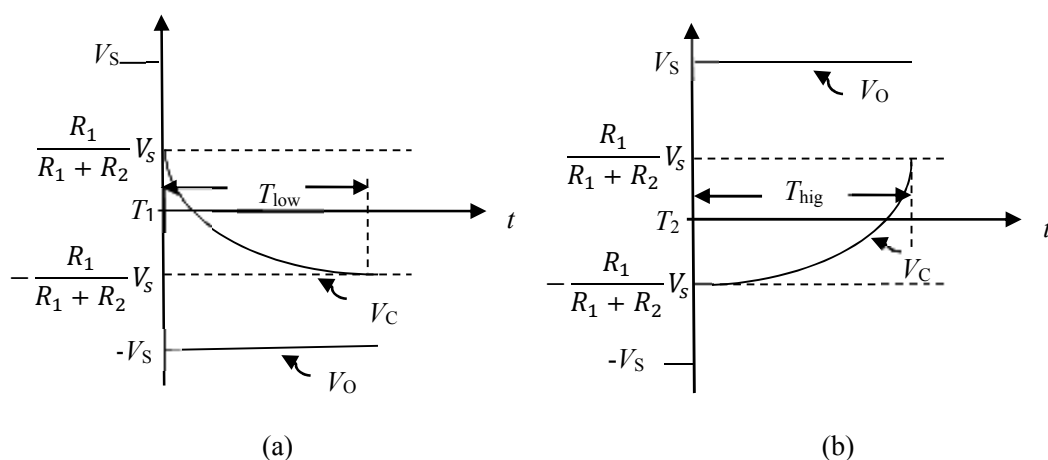


图 3.1.4 计算振荡器的时间周期
(a) u_c 从高到低 (b) u_c 从低到高

容易证明上升过程的持续时间 T_{high} 恰好等于下降过程的持续时间 T_{low} ，所以只要求出电容从初值 $V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ 放电到终值 $-V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ 所用的时间 T_{low} 即可。

T_1^+ 时， u_- 变得略大于 u_+ ，输出 u_o 实际上瞬间跳变到 $-V_s$ ，而 u_+ 变 $-V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ 。现在电容开始放电， u_- 开始减小，当 u_- 降低到 $u_+ = -V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ ， u_o 将从低跳到高。电容放电的动态过程遵循简单的一阶微分方程，它的解为

$$u_c = -V_s + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + 1 \right) V_s e^{-t/RC} \quad (3.1.3)$$

我们需要求出 T_{low} ，即 u_c 按式 (3.1.3) 降到 $-V_s R_1 / (R_1 + R_2)$ 所用的时间。解得

$$T_{\text{low}} = R_3 C \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (3.1.4)$$

因此，振荡器的周期 T 为

$$T = 2R_3 C \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \quad (3.1.5)$$

图 3.1.2 所示电路输出方波信号的峰值取决于运放的电源电压，理想状态时为运放电源电压 $\pm V_{CC}$ ，如果运放采用 $\pm 12V$ 供电，则输出电压峰值大约 10V，峰峰值约 20V，不满足方波输出电压要求。为了保证输出方波峰峰值的指标要求，可以采用分压电路或二极管稳压电路，二极管稳压电路可以参考 3.2.4 节相关内容。如果后级积分电路影响到方波的输出幅度，可以用运放构成一个跟随器加以隔离。

2、方波发生器的设计与制作

根据题目要求设计方波发生器并搭建电路，完成下列测试。

- (1) 用示波器测量方波发生器的输出波形参数，并定量画出输出方波波形。（注意方波信号的指标要求）
- (2) （选作）用示波器 FFT 运算观察输出方波信号频谱。

3.1.3 三角波产生电路设计

根据设计要求需要将方波转为三角波，可以用积分电路来完成。

1、积分电路基本原理

由运算放大器构成的积分电路如图 3.15 所示。

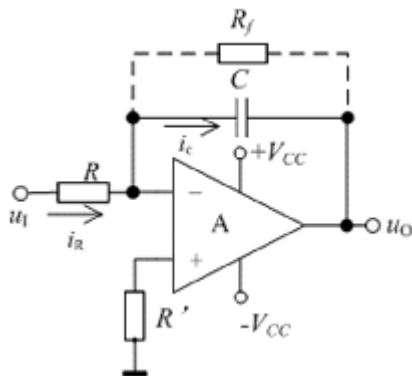


图 3.1.5 积分运算电路

在图 3.1.5 所示积分运算电路中，由于集成运放的同相输入端通过 R' 接地， $u_+ = u_- = 0$ ，为“虚地”。

电路中，电容 C 中电流等于电阻 R 中电流

$$i_C = i_R = \frac{u_I}{R} \quad (3.1.6)$$

输出电压与电容上电压的关系为 $u_O = -u_C$ ，而电容上电压等于其电流的积分，故

$$u_O = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_I dt \quad (3.1.7)$$

当输入为阶跃信号时，若 t_0 时刻电容上的电压为零，则输出电压波形如图 3.1.6 (a) 所示。当输入为方波时，输出电压波形为图 3.1.6 (b) 所示。可见，利用积分运算电路可以实现方波-三角波的波形变换。

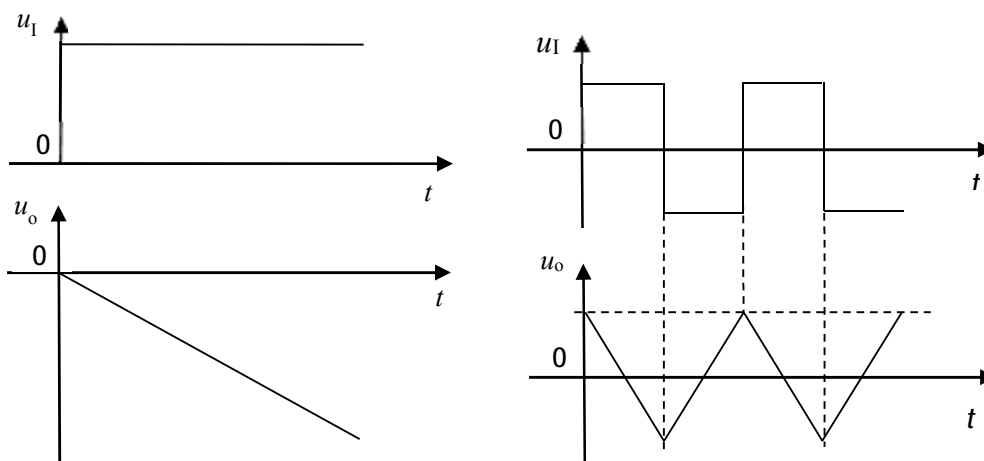


图 3.1.6 积分运算电路在不同输入情况下的波形

(a) 输入为阶跃信号

(b) 输入为方波

在实用电路中，为了防止低频信号增益过大，常在电容上并联一个电阻加以限制，如图 3.1.5 中虚线所示。

由式 (3.1.7) 可知调节 R 或 C 可以改变三角波的峰峰值，这里可以采用改变电阻（用电位器调节）来达到设计要求中的三角波峰峰值。

2、积分电路的设计与制作

根据题目要求设计并搭建积分电路，完成下列测试。

(1) 用函数发生器提供一个峰峰值为 4V，频率为 5KHz 的方波信号（模拟方波发生器），用示波器测量积分电路的输出三角波参数，并定量画出三角波波形。

(2) 将方波发生器产生的方波输入到积分电路，用示波器测量积分电路的输出三角波参数，并定量画出输出三角波波形。

(3) （选作）用示波器 FFT 运算观察输出三角信号频谱。

3.1.4 同相加法电路设计

1、同相加法器的电路原理

当多个输入信号同时作用于集成运放的同相输入端时，就构成同相求和运算电路，如图 3.1.7 所示。

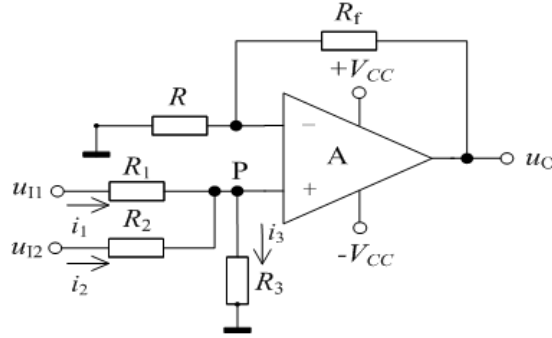


图 3.1.7 同相加法电路

由同相比例运算电路可得：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) u_p \quad (3.1.8)$$

因此求出图 3.1.7 所示电路的 u_p 即可得到输出电压与输入电压的运算关系。

节点 P 的电流方程为：

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 &= i_3 \\ \frac{u_{I1} - u_p}{R_1} + \frac{u_{I2} - u_p}{R_2} &= \frac{u_p}{R_3} \\ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) u_p &= \frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2} \end{aligned}$$

则同相输入端电位为：

$$u_p = R_p \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}\right) \quad (3.1.9)$$

式中 $R_p = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$ ，设 $R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 = R \parallel R_f$ ，则：

$$\begin{aligned} u_o &= \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) R_p \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}\right) \\ &= \frac{R+R_f}{R} \frac{RR_f}{R+R_f} \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}\right) = R_f \left(\frac{u_{I1}}{R_1} + \frac{u_{I2}}{R_2}\right) \end{aligned} \quad (3.1.10)$$

由此可知，图 3.1.7 所示电路，合理取电阻的值，可以实现题目要求的同相加法器。

2、同相加法器的设计与制作

根据题目要求设计并搭建同相加法器，完成下列测试。

(1) 将方波发生器产生的方波信号、积分电路产生的三角波信号输入到同相加法器的两个输入端，用示波器测量同相加法器的输出信号（复合信号）参数，并定量画出输出信号波形。

(2) 用示波器 FFT 运算功能定性观察输出信号频谱。

3.1.5 滤波器设计

由信号系统理论可知：

如果方波信号的峰值为 u_m ，则其傅里叶级数展开为：

$$u(t) = \frac{4u_m}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots) \quad (3.1.10)$$

可知：方波包含了 1、3、5……等奇次谐波正弦分量，只要用滤波器滤掉高次谐波分量就可以恢复出正弦波。

如果三角波信号的峰值为 u_m ，则其傅里叶级数展开为：

$$u(t) = \frac{8u_m}{\pi^2} (\cos \omega t + \frac{1}{9} \cos 3\omega t + \frac{1}{25} \cos 5\omega t + \dots) \quad (3.1.11)$$

可知：三角波包含了 1、3、5……等奇次谐波正弦分量，只要用滤波器滤掉高次谐波分量就可以恢复出正弦波。

要从同频率的方波和三角波叠加后的复合信号中得到正弦波，可以采用滤波器得到。

1、有源滤波器基础

滤波器是对信号的频率具有选择性的设备，其功能是使特定频率范围内的信号顺利通过，而阻止其他频率的信号通过。在实际电子系统中，往往包含有一些不需要的信号成分，应设法将这些不需要的信号成分衰减到足够小的程度，或者把有用的信号挑选出来，常用的方法是使用滤波器对信号进行滤波。

滤波器分为无源滤波器和有源滤波器两大类。无源滤波器是仅由无源元件(电阻、电容、电感)组成，其通带增益及截止频率通常会随负载变化而变化，常常不符合信号处理的要求。有源滤波电路一般由 RC 网络和集成运放组成，因而必须在合适的直流电源供电的情况下才能起滤波作用，同时还可以进行放大，有源滤波电路不适于高电压大电流的负载，只适用于信号处理。

本次滤波器设计可以选择有源滤波器。根据信号频谱分析，选用高 Q 值低通滤波器或者带通滤波器可以满足题目要求。

图 3.1.8 为简单的二阶低通有源滤波器，其本质上由二阶无源低通滤波器加运放构成。

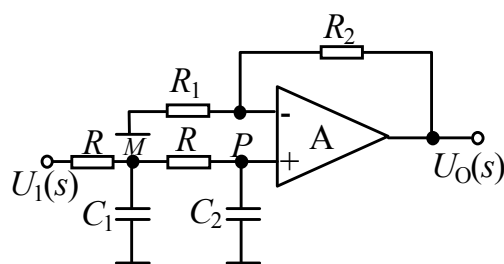


图 3.1.8 简单的二阶低通有源滤波器

相对于一阶电路，由于增加了 RC 环节，滤波器的过渡带变窄，衰减斜率加大。虽然简单二阶低通滤波电路的衰减斜率达 -40dB/十倍频，但这种电路在转折处的“膝弯”较大，滤波效果不好。若适当地引入正反馈，或采用多路反馈，则可使“膝弯”减小，滤波特性更加理想。

图 3.1.9 为带通滤波器，利用阻抗模型，用节点法可以推导出电路的传递函数，由于过程较为繁琐，这里略去过程，只给出结论，关注过程的，可以参考相关理论教材。

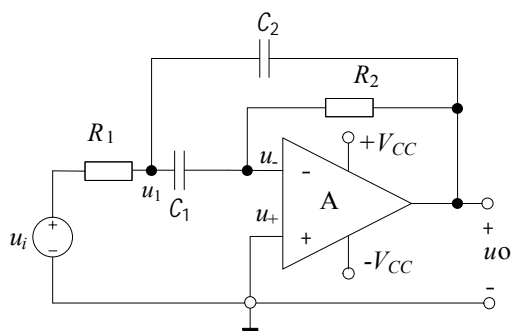


图 3.1.9 有源带通滤波器

$$V_o = \frac{-s\left(\frac{g_1}{C_1}\right)V_i}{s^2 + s\frac{C_1+C_2}{C_1C_2}g_2 + \frac{g_1g_2}{C_1C_2}} \quad (3.1.12)$$

$$\text{振荡角频率} = \omega_0 = \sqrt{\frac{g_1g_2}{C_1C_2}} \quad (3.1.13)$$

$$\text{带宽} = g_2 \frac{C_1+C_2}{C_1C_2} \quad (3.1.14)$$

本次实验可以采用“实验 1.2 RC 有源滤波器”中二阶有源低通滤波器来实现，电路参考图 1.2.4。

更多关于有源滤波器的理论基础请查阅相关教材，这里不再赘述。

2、有源滤波器的计算机辅助设计

滤波器的设计计算十分麻烦，幸运的是现在我们可以借助于计算机辅助设计软件。

FilterPro 是德州仪器 (TI) 推出的普及型有源滤波器设计工具，最新的版本是 FilterPro v3.1，可通过 TI 的网站免费下载。

FilterPro 可以采用 MFB、Sallen-Key 拓扑结构设计不同类型和响应的有源滤波器。这些滤波器类型有低通、高通、陷波/带阻、带通以及全通相移/时间延迟，响应包括 Bessel、Butterworth、Chebychev、Gaussian 以及线性相位。可用来设计 1 至 10 个极点的滤波器。


使用 FilterPro 设计有源滤波器的步骤如下：

(1) 打开 FilterPro

打开 FilterPro 以后现实的界面如图 3.1.10 所示。

提示你两个选择：

- I 创建一个新设计
- I 选择一个已有的设计

单击图标可以通过向导创建新设计。

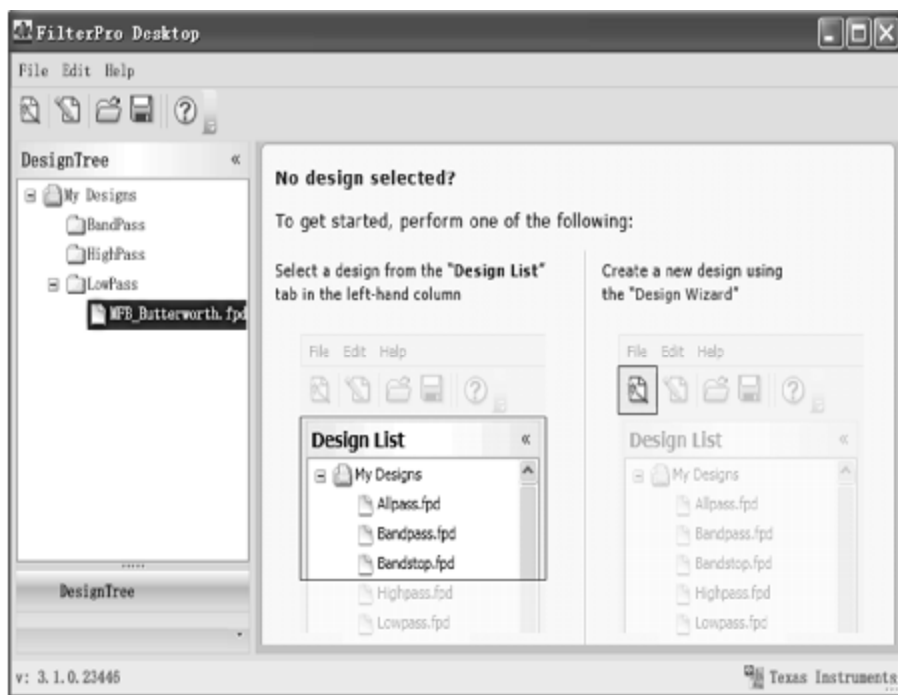


图 3.1.10 FilterPro 的开始界面

(2) 使用滤波器设计向导

第一步：滤波器类型。如图 3.1.11 所示。

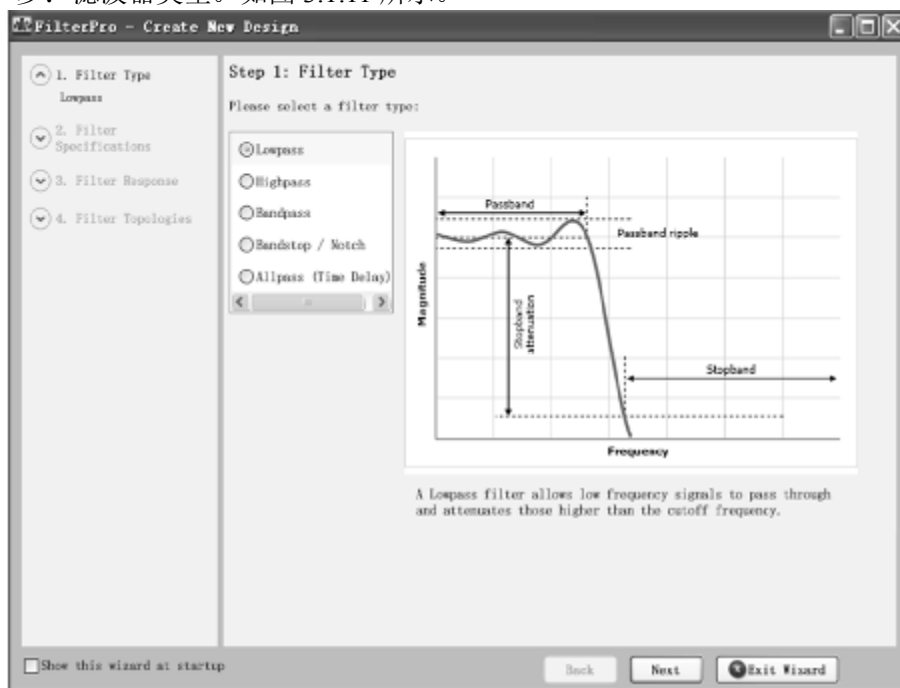


图 3.1.11 设计向导：滤波器类型

根据需求选择滤波器类型。该向导允许的滤波器类型有：

- | 低通
- | 高通
- | 带通
- | 带阻/陷波

I 全通（时间延迟）

第二步：滤波器参数

为第一步所选的滤波器类型设置滤波参数。如图 3.1.12 所示。

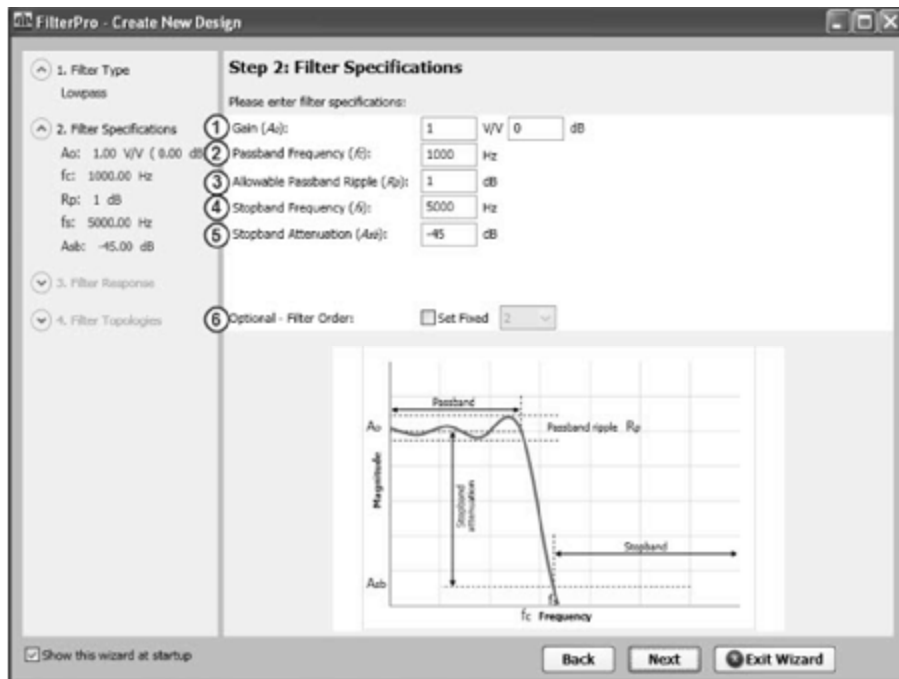


图 3.1.12 设计向导：滤波器参数

允许的滤波器参数如下：

U 低通

- I Gain(Ao): 按伏每伏(V/V)或分贝(dB)输入滤波器所需的总增益。增益值会自动转换为未输入的其他单位。例如，若在 V/V 框中输入 1，则 0dB 将由应用程序自动输入，反之亦然
- I Passband Frequency(f_c): 按 Hz 输入所选滤波器的通带频率
- I Allowable Passband Ripple(R_p): 按 dB 输入最大允许的通带纹波
- I Stopband Frequency(F_s): 按 Hz 输入所选滤波器的阻带频率
- I Stopband Attenuation(A_{sb}): 按 dB 输入所选滤波器的阻带衰减
- I Filter Order: 如果想强制滤波器的阶数(最大到 10)，勾选 set Fixed?框

U 带通

- I Gain(Ao): 按伏每伏(V/V)或分贝(dB)输入滤波器所需的总增益。增益值会自动转换为未输入的其他单位。例如，若在 V/V 框中输入 1，则 0dB 将由应用程序自动输入，反之亦然
- I Center Frequency(f_o): 输入所选滤波器的中心频率
- I Allowable Passband Ripple(R_p): 按 dB 输入最大允许的通带纹波
- I Passband Bandwidth(BW_p): 输入所选滤波器的通带带宽
- I Stopband Bandwidth(BW_s): 输入所选滤波器的阻带带宽

l Stopband Attenuation(Asb): 按 dB 输入所选滤波器的阻带衰减

l Filter Order: 如果想强制滤波器的阶数(最大到 10), 勾选 set Fixed?框
其它高通、带通、带阻等滤波器的参数设定, 这里不一一罗列, 可查阅相关资料。

第三步: 滤波器响应

这一步允许为第一步所选滤波器选择响应, 如图 3.1.13 所示。FilterPro™ 允许:

- l Bessel (贝塞尔)
- l Linear Phase 0.05 degrees (线性相位 0.05 度)
- l Butterworth (巴特沃兹)
- l Gaussian to 6dB (高斯 6dB)
- l Linear Phase 0.5 degrees (线性相位 0.5 度)
- l Gaussian to 12dB (高斯 12dB)
- l Chebyshev with Arbitrary Ripple (任意纹波的切比雪夫)

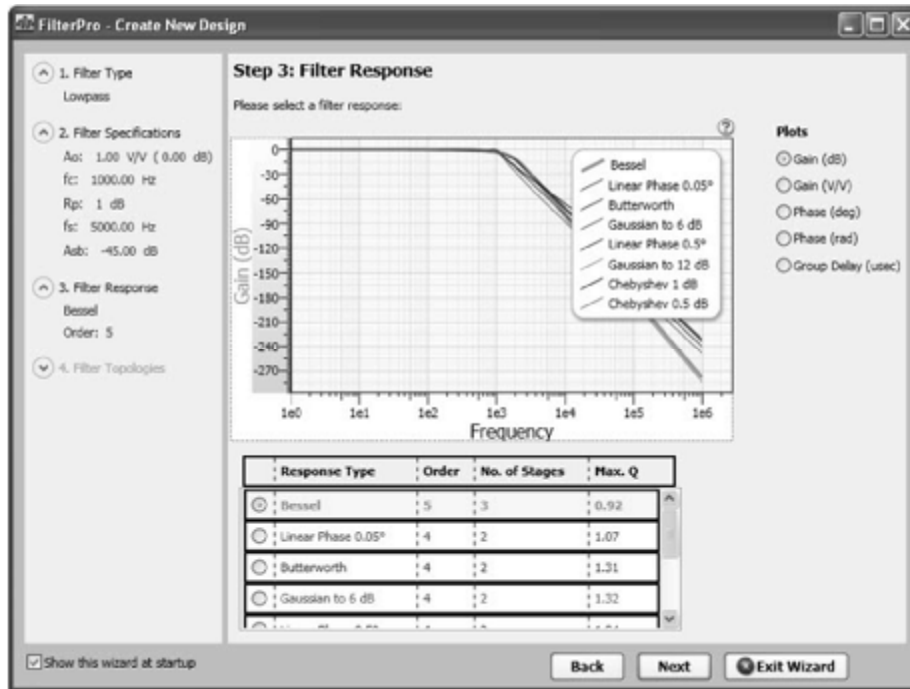


图 3.1.13 设计向导: 滤波器响应

第四步: 滤波器拓扑

从可用的拓扑中选择, 如图 3.1.14 所示。它们是:

- l Sallen-Key, 即压控电压源型
- l Multiple-Feedback (Single-Ended), 即多路反馈型 (单端)
- l Multiple-Feedback (Fully Differential), 即多路反馈型 (全差分)

选择你想用的拓扑单选框, 将显示出拓扑的预览。

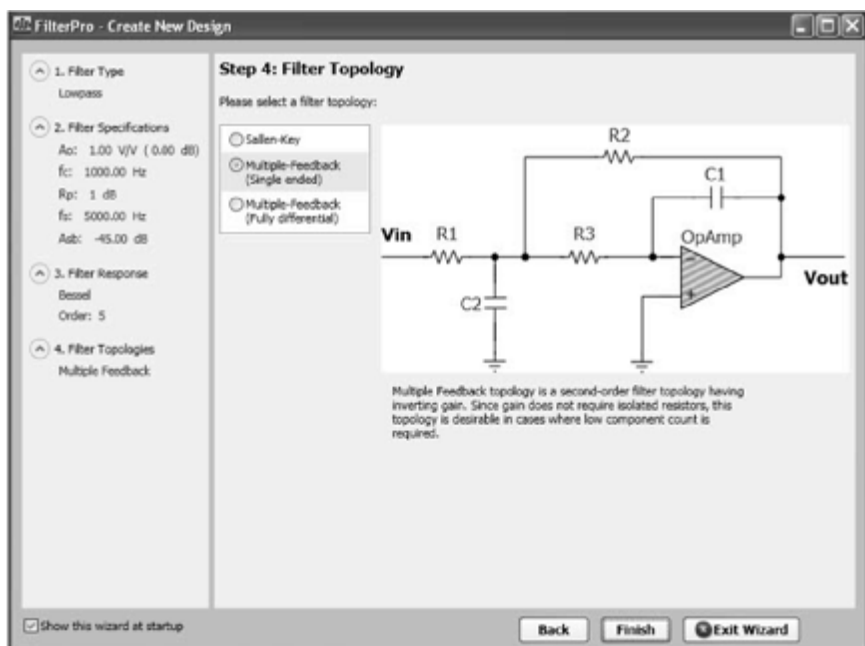


图 3.1.14 设计向导：滤波器拓扑

单击“Finish”完成创建新设计，稍候设计将出现在屏幕上。如果你对设计满意以及在做任何更改之前，请保存设计，以防止丢失所做的工作。

(3) 在电路图上修改元件值

更改元件值是在 FilterPro 中修订设计的一种强大方法，如图 3.1.15 所示。设计是使用一般信息建立的，因此用户可以根据需要修订设计，如图 3.1.16 所示。

FilterPro 允许电阻和电容从 E6~E192 的系列标准中任意选择。

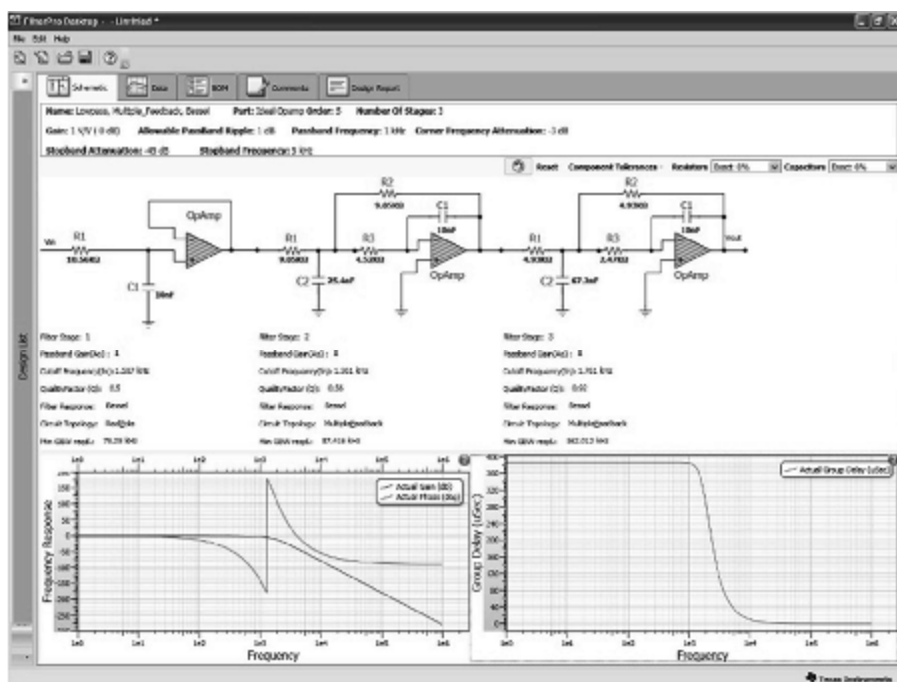


图 3.1.15 设计结果

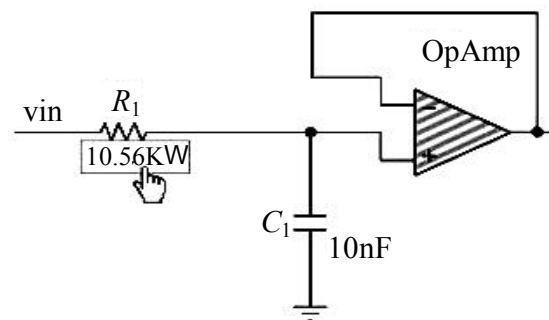


图 3.1.16 在电路图上修改元件值

2、有源滤波器的设计与制作

根据题目要求设计并搭建有源滤波器电路，完成下列测试。

(1) (选作) 用函数发生器提供一个峰峰值为 4V，频率为 5KHz 的方波信号，输入到有源滤波器的输入端，用示波器测量有源滤波器的输出信号，观察是否得到一个 5KHz 正弦信号，定量画出该正弦信号波形。

(2) 将同相加法器输出的复合信号接入到有源滤波器，用示波器测量有源滤波器的输出信号，观察是否得到一个 5KHz 正弦信号，定量画出该正弦信号波形。

实验 3.2 声光火灾报警器设计与实现

3.2.1 设计要求

通过两个温度传感器获得的电压差实现火灾自动报警，设计框图如图 3.2.1 所示， u_{11} 和 u_{12} 分别来源于两个温度传感器，他们安装在室内同一处。但是，一个安装在金属板上，产生 u_{11} ；另一个安装在塑料壳体内部，产生 u_{12} 。

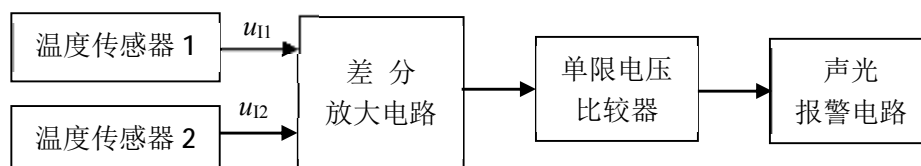


图 3.2.1 火灾报警电路的方框图

在没有火情时，即正常情况下，两个温度传感器所产生的电压近似相等， $(u_{11} - u_{12})$ 数值很小，发光二极管和晶体管均截止，发光二极管不亮，蜂鸣器不响。

当有火情时，安装在金属板上的温度传感器因金属板导热快升温较快，而安装在塑料壳体内部温度传感器升温较慢，使 u_{11} 和 u_{12} 产生差值电压，差值电压增大到一定数值时（设温度差大于 50°C ），发光二极管发光、蜂鸣器鸣叫，发光二极管和蜂鸣器同时发出警告。

3.2.2 利用二极管的温度特性设计简易温度传感器

温度传感器是指能感受温度并转换成可用输出信号的传感器。温度传感器是温度测量仪表的核心部分，品种繁多。这里主要讨论如何利用二极管的温度特性设计并制作温度传感器。

1、二极管的温度特性

二极管具有单向导电特性，其伏安特性曲线如图 3.2.2 所示，利用其单向导电特性广泛应用于整流、限幅、钳位等电子电路设计中。

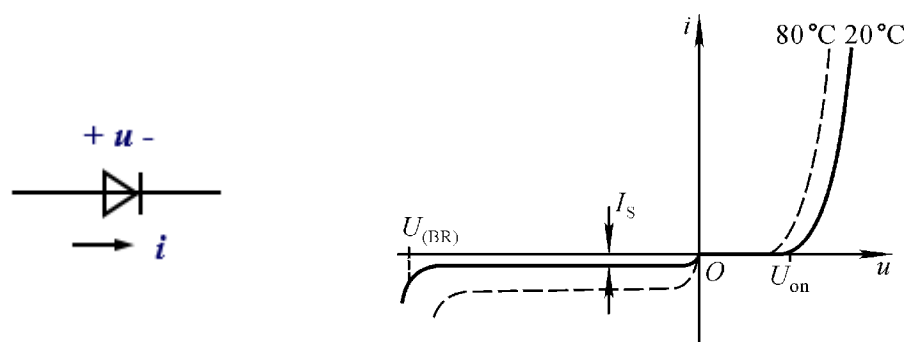


图 3.2.2 二极管电压电流特性曲线

由二极管正向特性曲线可知：在导通区域，二极管的正向电压略有增加，将引起正向电流较大幅度增加。二极管的电压电流关系曲线与温度有关，通常是温度升高，其正向伏

安特性曲线左移，如图 3.2.2 所示。

可知，当二极管正向电压保持不变，温度升高时，其正向电流会增加；或者保持二极管正向电流不变，则随着温度升高，二极管两端电压会减小。

通常，流过二极管的正向电流固定时，温度每上升 1 度，正向电压下降大约 2mV。

2、温度传感器设计示例

由此可知，二极管能够将温度变化量转换为相应的电压量，具有温度传感器的特性。由二极管制作温度传感器需要解决如何在温度变化的情况下，二极管的正向电流保持不变（当然其正向电压一定会改变），如何提取二极管的正向电压值（温度改变引起的变化量），以利于能送到后级电路进行信号处理？

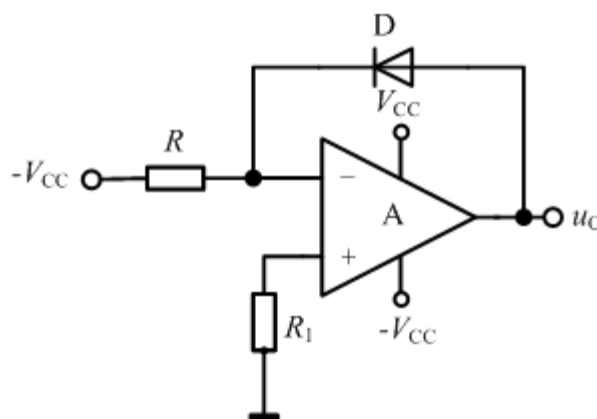


图 3.2.3 一种温度传感器设计示例

图 3.2.3 为一种设计示例，由运放的特性可知：

流过二极管的电流为：

$$I_D = I_R = \frac{0 - (-V_{CC})}{R} \quad (3.2.1)$$

运放的输出电压为二极管的正向电压，即：

$$u_o = u_D \quad (3.2.2)$$

当温度升高时，二极管正向电压减小，即运放输出电压减小。温度每升高 1℃，运放的输出电压会减小 2mV。

二极管可以选择 1N4148，其最大正向电压可以达到 1V，正常正向电流 为 150mA ，最大正向电流可达 500mA。

3、温度传感器设计与制作

要求：设计并搭建两个温度传感器（两个温度传感器参数选择一样）。

测试要求：

- （1）用数字电压表测量正常情况下两个温度传感器的输出电压；
- （2）改变二极管的环境温度（可以用电烙铁、打火机靠近二极管或者直接用手捏住二极管），观察输出电压是否会减小；

注意事项：注意运放的电源连接，温度传感器的二极管尽量预留空间，便于测试时改

变二极管的温度。

3.2.3 差分放大电路的设计与制作

两个温度传感器安装在室内同一处，一个安装在金属板上，安装在金属板上的温度传感器因金属板导热快升温较快，产生 u_{11} ；另一个安装在塑料壳体内部，而安装在塑料壳体内部温度传感器升温较慢，产生 u_{12} 。当有火情时， u_{11} 和 u_{12} 产生差值电压，需要将差值电压进行放大处理，可以采用差分放大器来实现。

1、差分放大器设计示例

由运放构成的典型差分放大电路如图 3.2.4 所示，输入级参数具有对称性，是双端输入的比例运算电路，也可实现差分放大。

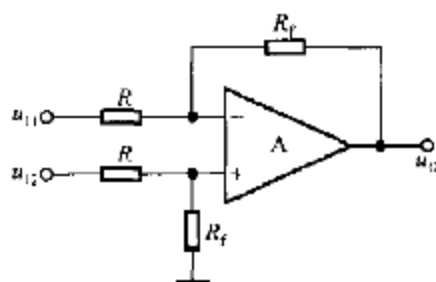


图 3.2.4 差分放大器

根据运放的虚短路、虚断路很容易得到输出电压 u_o 为：

$$u_o = \frac{R_f}{R} (u_{12} - u_{11}) \quad (3.2.3)$$

如果设计 10 倍放大，可以选取 $R_f=10k\Omega$ ， $R=1k\Omega$ 。

题目要求两路温度传感器相差 50°C 时启动后续报警电路，即两路温度传感器输出的电压差值为 0.1V 时，要改变后续电压比较器的状态，故差分放大器的放大倍数要结合后续比较器的比较门限来进行设计。

2、差分放大器设计与制作

要求：在面包板上搭建所设计的差分大电路，并完成下列测试。

- （1）测试差分放大电路放大倍数是否满足设计要求，输入信号可以自行设计产生两路直流信号。
- （2）将差分放大器与两路温度传感器级联，测试正常情况下差分放大的输出电压。
- （3）将差分放大器与两路温度传感器级联，模拟发生火灾时（可以用电烙铁、打火机靠近二极管或者直接用手捏住二极管），测试差分放大的输出电压。

3.2.4 电压比较器的设计与制作

随着温度的持续升高，差分放大的输出电压会一直增加，当差分放大输出达到某一设定值，需要启动后续报警电路，所以设计比较器来进行判决。

1、比较器设计示例

电压比较器是对输入信号进行鉴别与比较的电路，广泛用于各种判决、报警等电路中。

利用运放的饱和区特性可以构成电压比较器，集成运放处于开环或仅引入正反馈时工作在饱和区，如图 3.2.5 所示。

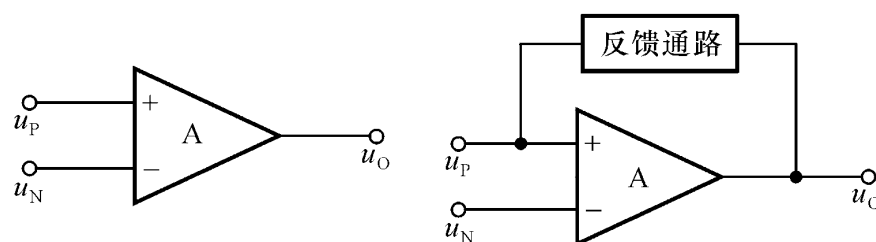


图 3.2.5 运放工作在饱和区的电路特征

运放工作在饱和区时，电压传输特性如图 3.2.6 所示，此时运放输出电压为 $\pm U_{OM}$ 。 U_{OM} 的大小取决于运放的电源电压，理想状态时为运放电源电压值。

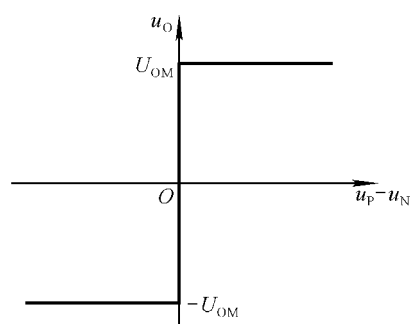


图 3.2.6 运放饱和区电压传输特性

由图 3.2.6 可知：当 $u_P > u_N$ 时， $u_O = +U_{OM}$ ； $u_P < u_N$ 时， $u_O = -U_{OM}$ 。运放的结构特点决定了在饱和区时运放的净输入电流仍然为 0，满足线性分析的“虚断”特性。

根据设计要求，可以设计一单门限比较器，设计电路如图 3.2.7 所示。

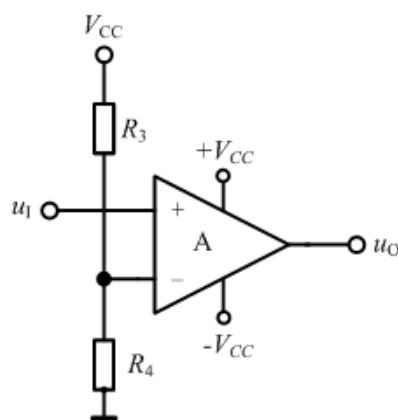


图 3.2.7 单门限比较器

图 3.2.7 电路的阈值电压 U_T 为：

$$U_T = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC} \quad (3.2.4)$$

图 3.2.7 比较器电路的电压传输特性如图 3.2.8 所示。

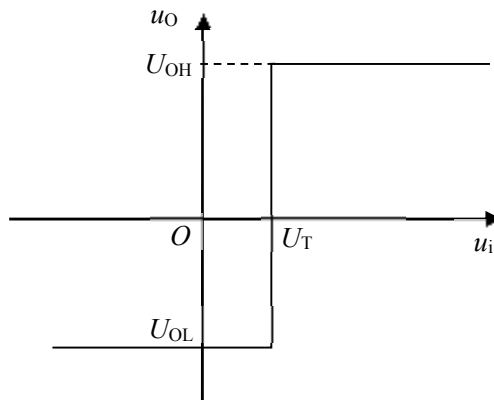


图 3.2.8 电压传输特性

为适应负载对电压幅值的要求，比较器输出端通常需要加限幅电路，限幅电路可以利用两个稳压二极管来实现，带限幅电路的比较器如图 3.2.9 所示。

根据后级电路的电压要求，选定稳压二极管。需要首先确定该管的稳压值、最大电流（可由功率值得到）、最小电流等几个重要参数，这是稳压管电路的设计重要依据。

假定选取稳压管型号为 1N4733，查阅 1N4733 数据手册可知该稳压二极管参数为：功率 0.5W、稳压值为：5.1V、最小稳定电流 $I_{zmin}=1mA$ 。由功率可以计算出该稳压管的最大允许电流 $I_{zmax}=0.5/5.1=98mA$ ，只要选择合适的限流电阻，使流过稳压管的电流在最小电流和最大电流值之间即可。

稳压管的典型稳压电路如图 3.2.9 所示。

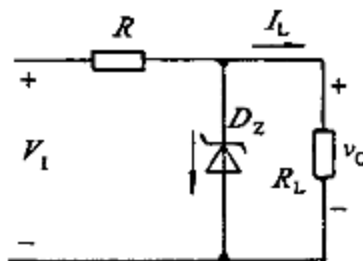


图 3.2.9 典型的稳压管电路

图 3.2.9 电路中，当 V_1 、 R_L 发生变化时，要使输出电压稳定为稳压管的稳压值，只需要合理选择限流电阻，使稳压管的工作电流 I_z 满足：

$$I_{zmin} \leq I_z \leq I_{zmax} \quad (3.2.5)$$

设 V_1 变化范围为 $V_{lmin} \sim V_{lmax}$ ， R_L 当变化范围为 $R_{Lmin} \sim R_{Lmax}$ ，二极管工作电流为：

$$I_z = \frac{V_1 - V_z}{R} - \frac{V_z}{R_L} \quad (3.2.6)$$

由式 3.2.6 可知，当 V_1 为 V_{lmax} ， R_L 为 R_{Lmax} 时，流过二极管的电流最大，但此时必须满足 $I_z \leq I_{zmax}$ ，所以有：

$$\frac{V_{lmax} - V_z}{R} - \frac{V_z}{R_{Lmax}} \leq I_{zmax} \quad (3.2.7)$$

同理可得，当 V_I 为 V_{lmin} ， R_L 为 R_{Lmin} 时，流过二极管的电流最小，但此时必须满足 $I_z \geq I_{zmin}$ ，所以有：

$$\frac{V_{lmin} - V_z}{R} - \frac{V_z}{R_{Lmin}} \geq I_{zmin} \quad (3.2.8)$$

联立式 3.2.7、3.2.8 可得限流电阻的取值范围为：

$$\frac{V_{lmax} - V_z}{I_{zmax} + \frac{V_z}{R_{Lmax}}} \leq R \leq \frac{V_{lmin} - V_z}{I_{zmin} + \frac{V_z}{R_{Lmin}}} \quad (3.2.9)$$

需要特别说明的是：稳压电路的设计中，限流电阻的选择不需要记忆上述公式，要理解上述选择原则后，根据具体电路来选择限流电阻的值。

对于本次设计中，比较器输出为 $\pm U_{OM}$ ，需要根据后续电路对电压幅度的要求，稳压到 $\pm U_Z$ ，可以采用两个稳压二极管分别对比较器输出的正、负电压进行稳压，参考电路设计如图 3.2.10 所示。

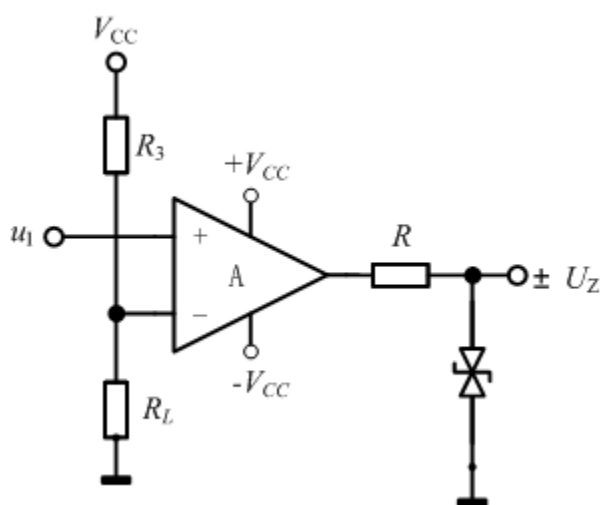


图 3.2.10 带稳幅输出的比较器电路

特别注意的是：在图 3.2.10 中，当比较器输出负电压时，后级负载电流为 0（三极管、二极管均截止）；输出正电压时，后级负载电流需要根据驱动电路所需电流来计算。（参见 3.2.5 节）

2、比较器设计与制作

要求：在面包板上搭建所设计的比较器电路，并完成下列测试。

（1）测试比较器电路功能是否正常。改变外加的输入信号，测试比较器的输出电压（适当多测几个不同输入电压的比较器状态）。

（2）将差分放大器的输出接入比较器的输入端，测试比较器的输出电压。（正常时比

较器输出电压应该为负值)。

(3) 将差分放大器的输出接入比较器的输入端, 模拟发生火灾时(可以用电烙铁、打火机靠近二极管或者直接用手捏住二极管), 测试比较器的输出电压。(比较器输出电压应该变为正值)。

3.2.5 报警驱动电路的设计与制作

正常情况下, 比较器输出为负电压, 后级发光二极管不亮、蜂鸣器不发声。随着温度升高到一定程度时, 比较器将输出为正电压, 这时要求二极管发光、蜂鸣器鸣叫, 所以需结合发光二极管、蜂鸣器的特性设计后级驱动电路。

1、发光二极管、蜂鸣器特性

发光二极管(LED)是半导体二极管的一种, 可以把电能转化成光能, 发光二极管与普通二极管一样是由一个PN结组成, 也具有单向导电性。双列直插发光二极管长的引脚为正极、短的引脚为负极, 如图3.2.2所示。当给发光二极管正极加上正向电压后, 会发光, 发光强度与其正向电流相关。红色发光二极管的导通电压一般为1.5~2V, 工作电流为10~20mA。

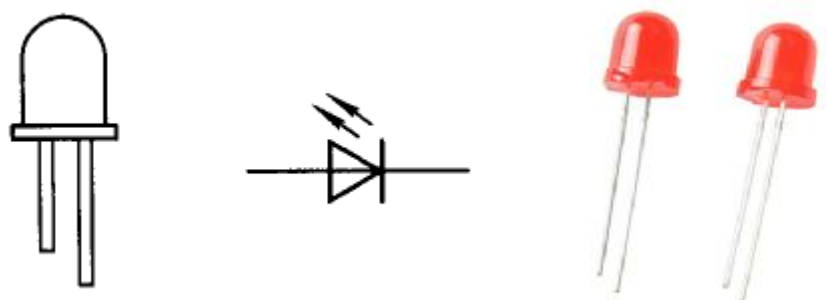


图 3.2.11 发光二极管

蜂鸣器(Buzzer)是一类常见的电声器件, 具有结构简单、紧凑、体积小、重量轻、成本低等优点, 发声范围一般有数百Hz到十几kHz, 广泛应用于各种电子设备当中作发声器件使用。蜂鸣器采用直流电压供电, 其能发出单调的或者某个固定频率的声音, 如滴滴滴, 嘟嘟嘟等。

最常用的两类蜂鸣器: 有源蜂鸣器和无源蜂鸣器。从驱动方式分类, 有源驱动和无源驱动, 有源蜂鸣器又称为直流蜂鸣器, 其内部已经包含了一个多谐振荡器, 只要在两端施加额定直流电压即可发声, 具有驱动、控制简单的特点, 但价格略高。无源蜂鸣器又称为交流蜂鸣器, 内部没有振荡器, 需要在其两端施加特定频率的方波电压才能发声, 具有可靠、成本低、发声频率可调整等特点。

图3.2.12为双列直插的一种蜂鸣器封装。蜂鸣器驱动电流与具体蜂鸣器和电源电压有关, 一般在20mA左右。



图 3.2.12 蜂鸣器

2、驱动电路设计

满足本次设计的报警驱动电路如图 3.2.13 所示，比较器的输出信号接入报警驱动电路，当比较器输出为负电压时，发光二极管、三极管均截止，电流为 0，报警电路不启动。

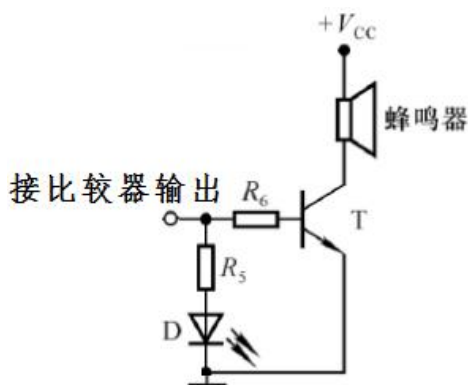


图 3.2.13 报警驱动电路

当比较器输出为正电压时，发光二极管因导通而发光，与此同时晶体管 T 导通，蜂鸣器鸣叫。

对红色发光二极管，导通电压一般为 1.5~2V，工作电流为 10~20mA。发光二极管的电流为

$$I_D = \frac{U_Z - U_D}{R_5} \quad (3.2.10)$$

因此合理选择电阻，使满足二极管的电流要求。

晶体管的基极电流为

$$I_B = \frac{U_H - U_{BE}}{R_6} \quad (3.2.11)$$

即集电极电流为

$$I_C = \beta I_B \quad (3.2.12)$$

若参数选择的结果是晶体管在导通时处于饱和状态，则

$$I_C = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_L} \leq \beta I_B \quad (3.2.13)$$

式中 U_{CES} 为管子的饱和管压降， R_L 是蜂鸣器等效电阻。

3、驱动电路设计与制作

要求：在面包板上搭建所设计的报警驱动电路，并完成下列测试。

(1) 测试报警驱动电路功能是否正常。

在报警驱动电路输入端模拟加一个与比较器输出相当的正直流电压，观察发光二极管是否发光、蜂鸣器是否发声。

在报警驱动电路输入端模拟加一个与比较器输出相当的负直流电压（或者比较器输入直接接地），观察发光二极管是否发光、蜂鸣器是否发声。

(2) 将比较器的输出端接至报警驱动电路的输入端，模拟发生火灾时（可以用电烙铁、打火机靠近二极管或者直接用手捏住二极管），观察系统工作是否正常。