

微电子器件实验 电压比较器与波形处理电路

范云潜，学号：18373486，搭档：徐靖涵，教师：彭守仲

微电子学院 184111 班

日期：2020 年 12 月 27 日

1 实验目的

之前的系列实验基于运算放大器的线性区（放大区）进行了运算电路的相关特性测量与研究，本实验对运算放大器的非线性区（饱和区）进行进一步的测量与研究，借此加深对运算放大器原理及其功用的理解。

2 实验所用设备及器件

主要设备有：电压源，任意波形发生器，示波器，台式万用表，相关线缆等，主要器件有四运放集成电路 LM324N、电容、电阻，稳压二极管。

3 实验基本原理及步骤

3.1 电压比较器

在运算电路的设计中，对于运放的正负输入始终有 **虚断**、**虚短**两个假设，从而可以顺利完成从两端较小差分电压到输出端较大变化： $V_{out} = A_v V_{in}$ 。分析其电路发现其电路均存在反馈回路，电流、电压不会直接作用到输入端，而是通过电阻或者二极管进行分流、分压，从而可以满足假设。

若是将反馈电阻去除，那么电路的假设就不再成立，此时运放两端的差分输入不再是接近 0 的小量，根据运放的放大倍数，输出会超出运放的供电电压，因此会被钳制在供电电压，失去放大作用，进入饱和区。

接下来进行相关电路转换点的理论推导：

过零比较器的电路结构如 **图 1**，没有任何的电阻掺入。

$$u_i \text{ 从低转向高: } u_- = u_i = u_+ = 0 = U_{T+}$$

$$u_i \text{ 从高转向低: } u_- = u_i = u_+ = 0 = U_{T-}$$

单限比较器的电路结构如 **图 2**，没有任何的电阻进行电压钳制。可以看出，其参考的运放正极电压保持恒定，这导致其转换阈值只有一个。

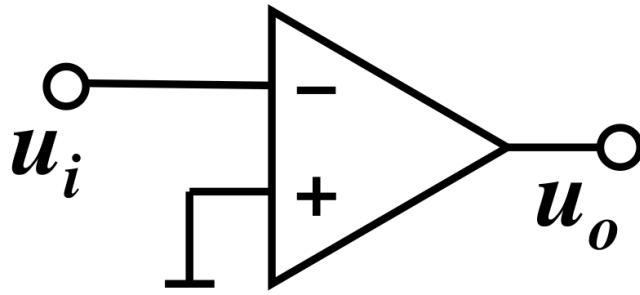


图 1: 过零比较器电路结构

$$\begin{aligned}
 u_i \text{ 从低转向高: } u_- &= \frac{U_{ref}}{R_1 + R_2} R_2 + \frac{u_i}{R_1 + R_2} R_1 = u_+ = 0 \\
 u_{i+} &= U_{T+} = -\frac{R_2}{R_1} U_{ref} \\
 u_i \text{ 从高转向低: } u_+ &= \frac{U_{ref}}{R_1 + R_2} R_2 + \frac{u_i}{R_1 + R_2} R_1 = u_- = 0 \\
 u_{i-} &= U_{T-} = -\frac{R_2}{R_1} U_{ref}
 \end{aligned}$$

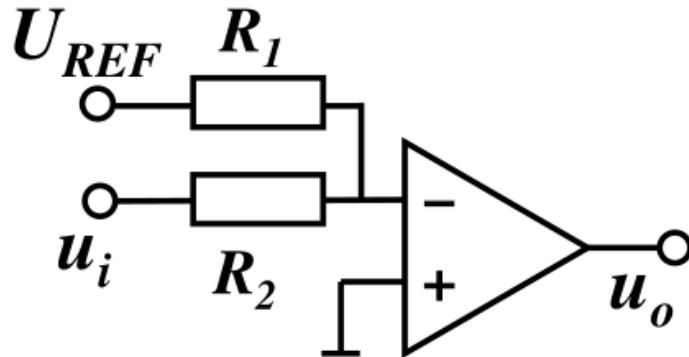


图 2: 单限比较器电路结构

滞回比较器的电路结构如图 3，其参考电压是随着运放输出而变化的，其参考电压的不一致导致了滞回特性。易知，在输入为低时，输出应为高，反之同理¹。

$$\begin{aligned}
 u_i \text{ 从低转向高: } u_- &= u_{i+} = u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OH} \\
 u_{i+} &= U_{T+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OH} \\
 u_i \text{ 从高转向低: } u_- &= u_{i-} = u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OL} \\
 u_{i-} &= U_{T-} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OL}
 \end{aligned}$$

其中， U_{OL} 和 U_{OH} 为系统的输出电压，与电源电压并不一致。

¹这里需要假定输入低到可以比正极的参考电压低，或者高到比其高。

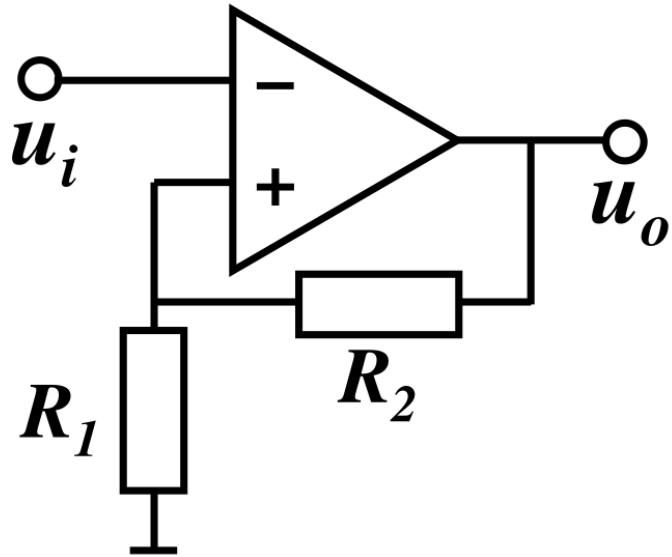


图 3: 滞回比较器电路结构

将图 3 中的接地转换为 U_{ref} 即可得到带参考电压的滞回比较器，类似的：

$$u_i \text{ 从低转向高: } u_- = u_+ = u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OH} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ref}$$

$$u_{i+} = U_{T+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OH} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ref}$$

$$u_i \text{ 从高转向低: } u_- = u_+ = u_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OL} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ref}$$

$$u_{i-} = U_{T-} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{OL} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ref}$$

其中， U_{OL} 和 U_{OH} 为系统的输出电压，与电源电压并不一致。

3.2 波形发生器

典型的用于生成波形的结构或器件有 RC 振荡电路、LC 振荡电路与石英晶振等。本次实验使用到的 RC 振荡电路基于正反馈。

3.2.1 正反馈系统

对于如图 4 的带反馈的系统，通常存在负反馈、正反馈两种形式，其中负反馈是为了增强系统对于干扰的抵抗能力，而正反馈则是使得系统迅速达到某一状态的手段。

对于此系统，其稳态为：

$$A(s)V_f\beta(s) = V_f$$

因此需要在变换域中需要满足 $A(s)\beta(s) = 1$ ，显然此关系不会普遍成立，因此最后会留存 $A(s_0)\beta(s_0) = 1$ 的分量，其变换域频率单一，在时域表现即为单一频率的正弦波。当然，为了开始振荡，需要 $A(s)\beta(s) > 1$ 。

对于存在稳态的系统来说，正反馈可以使得多种稳态的切换更加迅速，从而得到更加理想的系统输出，或者使单稳态系统的瞬态不稳定存续时间更短等。

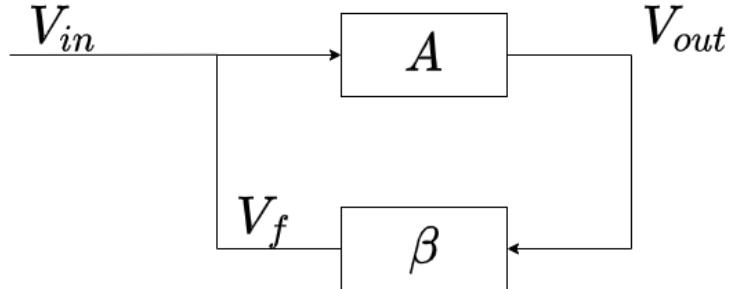


图 4: 反馈系统基本结构

3.2.2 RC 振荡电路

根据上一小节的分析，对于本次实验的电路，如图 5，输入可视为 $\dot{U_p}$ ，其开环增益为：

$$A(s) = \frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_P} = \frac{R_1 + R_F}{R_1}$$

其反馈系数为：

$$\begin{aligned}\beta(s) &= \frac{R//\frac{1}{sC}}{R + 1/sC + R//1/sC} \\ &= \frac{R/sC}{(R + 1/sC)^2 + R/sC} \\ &= \frac{1}{3 + RsC + 1/RsC}\end{aligned}$$

那么其幅值为：

$$|\beta| = \frac{1}{\sqrt{9 + (RC\omega - 1/RC\omega)^2}}$$

为了保持其幅值与相位，振荡频率为本征频率 $\omega = 1/RC$ ，此时幅度为 $1/3$ 。为了保持其环路增益大于 1，那么 $\frac{R_1 + R_F}{R_1} > 3$ ，因此 $R_F > 2R_1$ 。

3.2.3 滞回比较器

为了将正弦波整流成方波，需要具有滞回特性的电路，选用滞回比较器，如图 6。其中 $R = 50\Omega$ ， $R_1 = R_2 = 1k\Omega$ 。

为了使得稳压二极管工作在稳压状态，需要通过电路在约 $50mA$ 的位置。假设此时输出电压（已经稳压）为 $u_o = 7.5V$ ，运放输出端为 $10V$ ，那么：

$$\frac{10 - 7.5}{R} = \frac{7.5}{2k} + 50m$$

可以解得 $R = 46.512\Omega$ ，那么取 50Ω 是合理的。

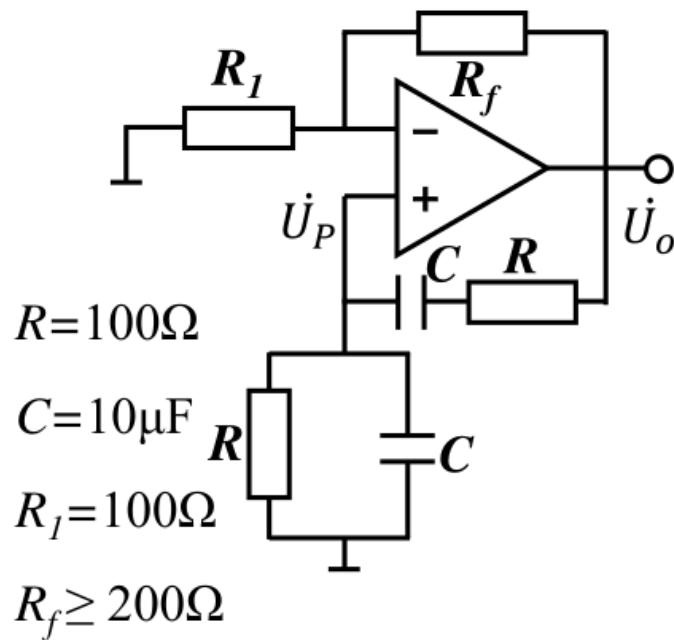


图 5: RC 桥式正弦波振荡电路

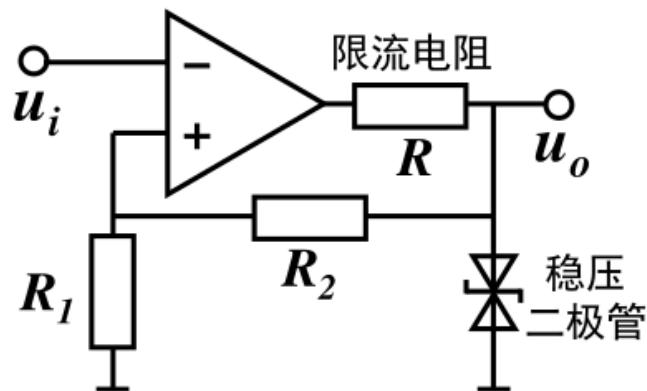


图 6: 滞回比较器

3.2.4 积分电路

基本原理在前序实验中有详细介绍，但是需要注意，若是 RC 常数越大，积分数值就会越小，对应的噪声越大。

3.3 实验步骤

3.3.1 过零比较器

- 按照图 1 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 5V$ ，设置三角波为输入，幅值、频率可较为自由选择
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形
- 根据输出峰峰值调节运放供电，直到输出峰峰值为 $10V$

3.3.2 单限比较器

- 按照图 2 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 5V$ ，设置三角波为输入，幅值、频率可较为自由选择
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形
- 根据输出峰峰值调节运放供电，直到输出峰峰值为 $10V$

3.3.3 滞回比较器

- 按照图 3 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 5V$ ，设置三角波为输入，峰峰值设为 $10V$ 、频率可较为自由选择
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形
- 由于滞回特性严格依赖于输出电压 U_{OH} 和 U_{OL} ，因此根据输出峰峰值调节运放供电，直到输出峰峰值为 $10V$

3.3.4 正弦信号发生器

- 按照图 5 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 10V$ ，设置可变电阻在 230Ω 左右
- 由于电路环路起振需要，微微调节可变电阻，引入系统噪声
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形

3.3.5 正弦波-方波转换

本质是一个滞回比较器，如图 6，需要注意的是，稳压二极管的存在将反馈回输入端的电压固定了，对 U_{OH} 和 U_{OL} 敏感度下降。

- 按照图 6 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 10V$
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形

3.3.6 方波-三角波转换

本质是一个积分电路，如图 7。

- 按照图 7 搭建电路，设置电源电压为 $\pm 10V$
- 示波器两通道分别连接 u_i 和 u_o ，观察波形
- 但是由于积分后，信号可能回超过运放供电，因此需要适当将供电电压调高（最高电压差为 $33V$ ），而这对之前两个电路影响较小

4 实验数据记录

4.1 过零比较器

如图 8。

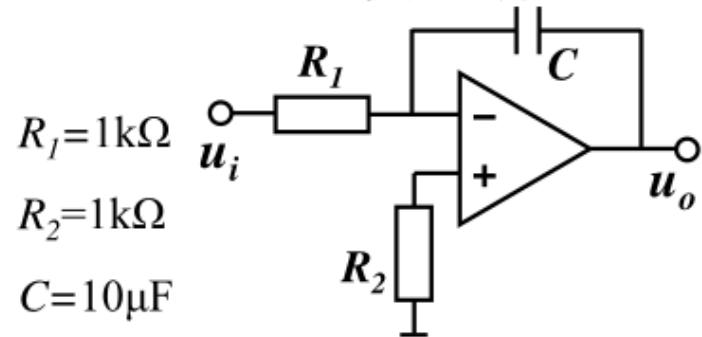


图 7: 积分电路结构

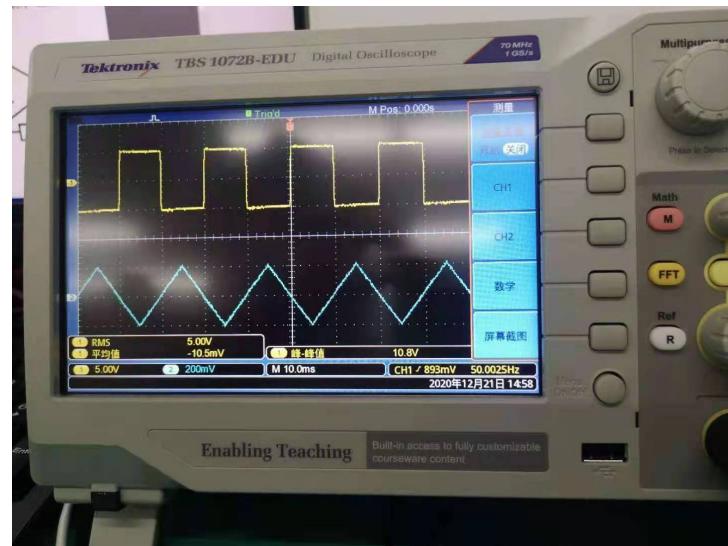


图 8: 过零比较器波形

4.2 单限比较器

如图 9。

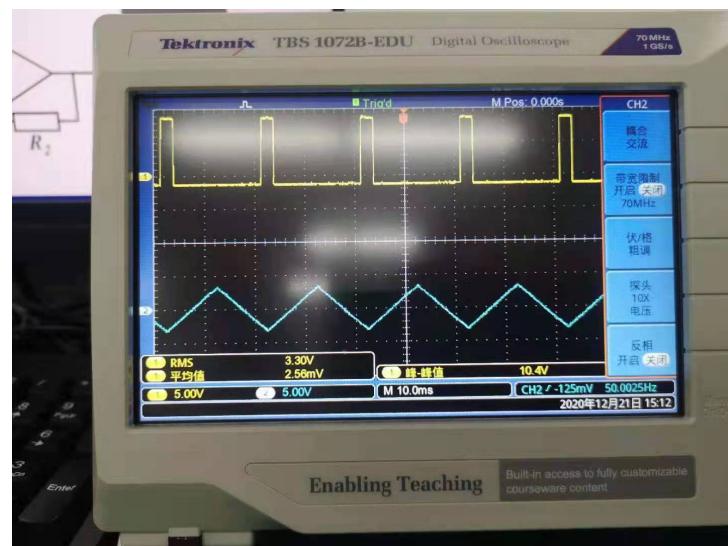


图 9: 单限比较器波形 $U_T = -2V$

4.3 滞回比较器

如图 10。

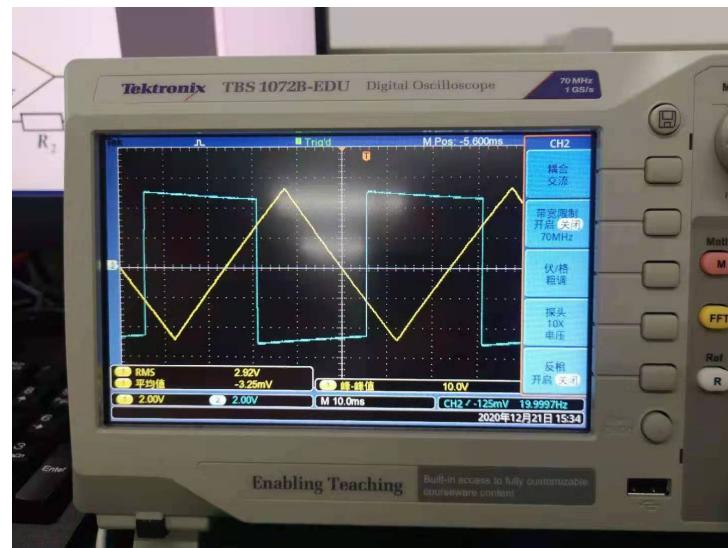


图 10: 滞回比较器波形 $\Delta U = 5V$

4.4 带参考电压的滞回比较器

如图 11。

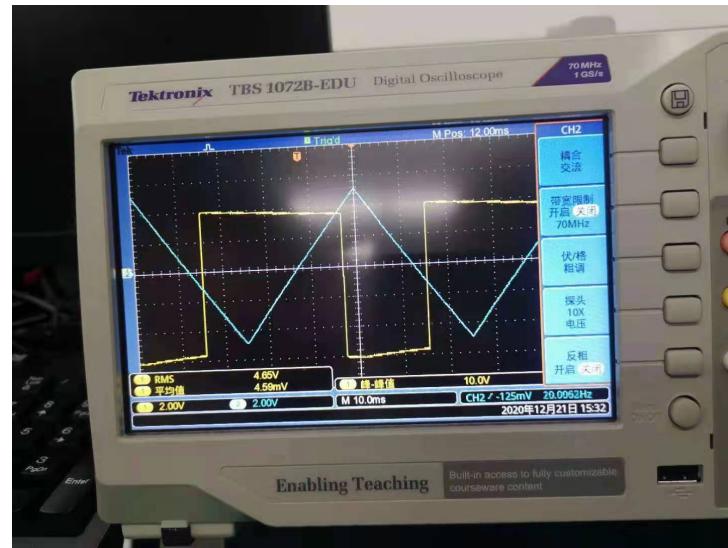


图 11: 带参考电压的滞回比较器波形 $U_{T1} = -1.5V, U_{T2} = 3.5V$

4.5 方波转换

如图 12。

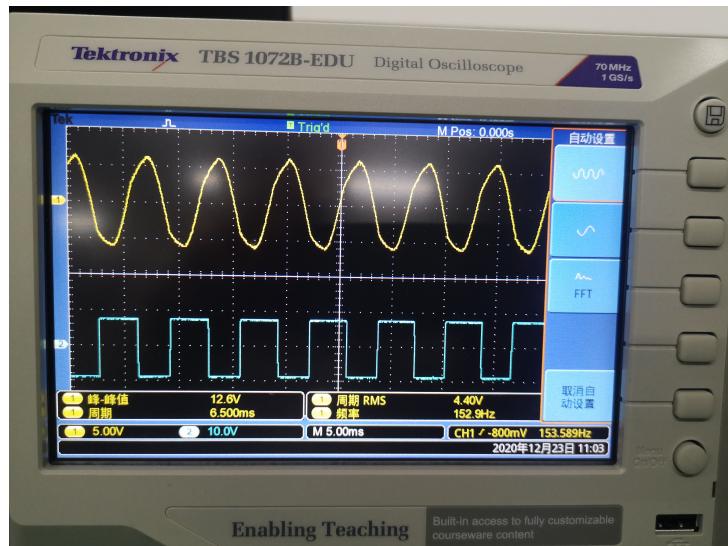


图 12: 正弦波-方波转换

4.6 三角波转换

如图 13。

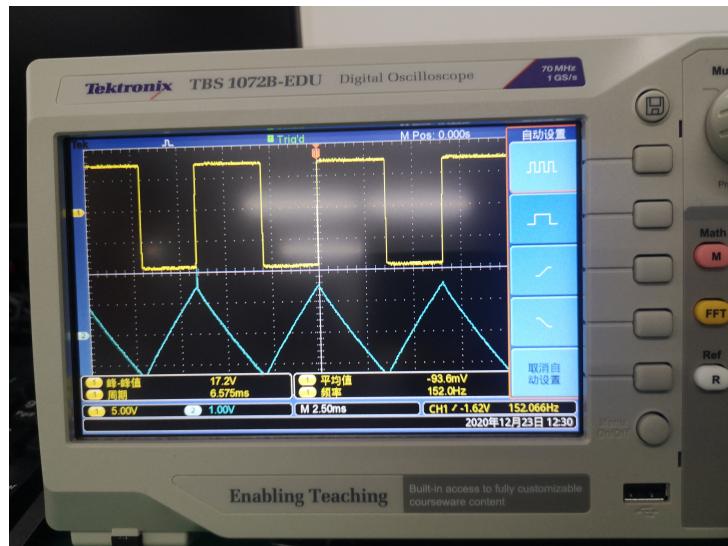


图 13: 方波-三角波转换

5 实验结果分析

以上图形表征着电路基本符合预期设计，接下来对实验中遇到的相关问题进行分析。

首先，由于相关比较器设计中的阈值电压计算时的参数涉及到 U_{OH} 和 U_{OL} ，而这两个电压在实际中均无法达到电源电压，因此需要在操作时调节电源电压使输出电压达到设计的预期。

另外，在波形发生器设计中，由于积分电路在电压过高会使得运放进入饱和区，因此无法表现出三角波特性，为此，需要将电源电压提高，运放的工作电压是 33V，取 30V 是合适的。

6 总结与思考

Q1. 回顾前几节课学到的内容，通过电压比较器得到方波后，如何得到三角波？

对方波进行积分可以得到三角波。

Q2. 设计一个简单的报警器，当输入电压超过 3V 时将 LED 灯点亮进行报警。

利用单限比较器实现即可，在输入大于 3V 时输出为高。对此进行设计， $-\frac{R_2}{R_1}U_{ref} = 3V$ ，因此取 $R_1 = R_2 = 100\omega$ 并且参考电压 $U_{ref} = -3V$ 即可。在负载端添加二极管与限流电阻，整体电路如图 14 所示，限流电阻需要以及二极管型号及其工作电流 I_w 、导通压降 U_d 、比较器输出电压 U_{OH} 进行选取，满足：

$$U_{OH} = I_w R + U_d$$

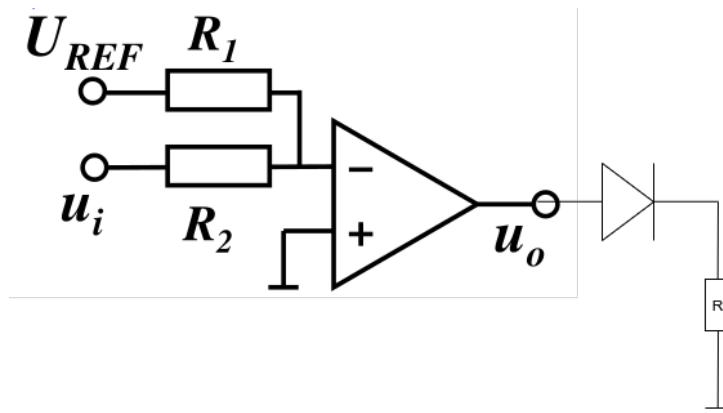


图 14: 报警电路

Q3. 如何选择限流电阻的阻值？

为了使得稳压二极管工作在稳压状态，需要通过电路在约 $50mA$ 的位置。假设此时输出电压（已经稳压）为 $u_o = 7.5V$ ，运放输出端为 $10V$ ，那么：

$$\frac{10 - 7.5}{R} = \frac{7.5}{2k} + 50m$$

可以解得 $R = 46.512\Omega$ ，那么取 50Ω 是合理的。

Q4. 给出波形发生器中 3 个电路的输入输出电压公式并计算输入输出电压的具体数值，与实验结果对比。

对于 RC 振荡电路，其频率是固定的，而理想情况下对幅度没有要求，幅度与运放供电相关，幅值为 $|U_{OH}| = |U_{OL}|$ ，由于存在衰减，无法精确计算。实际的 $V_{pp} = 12.6V$ 。

对于整流电路（比较器），其幅值是也是比较器的输出峰值，峰值应该是限流电压 $6 - 8V$ ，实际 $V_{pp} = 17.2V$ ，基本符合。

积分电路的幅值和 RC 相关， $U_O = \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_i dt + U_{O,pre}$ 。实际峰峰值为 $3V$ ，对方波积分得到积分项（除去常数项）为 $17.2/300/10m/2 = 2.86V$ ，基本符合。