

## 实验四 运算放大器的应用

### 1. 实验目的

- (1) 掌握集成运算放大器（以下简称运放）的正确使用方法。
- (2) 掌握集成运放的典型线性应用（即组成负反馈放大电路的应用）。
- (3) 掌握集成运放的典型非线性应用（即滞回比较器的应用）。

### 2. 实验电路与原理

#### (1) 由集成运放组成负反馈放大电路

以集成运放作为基本放大电路，外加反馈网络即构成了负反馈放大电路。

##### a) 同相比例放大电路

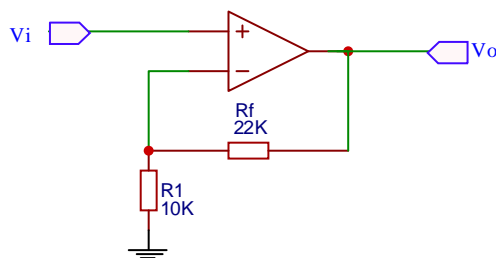


图 1 同相比例放大电路

同相比例放大电路如图 1 所示。输入电压  $v_i$  加至运放的同相输入端，输出电压通过反馈电阻  $R_F$  反馈到运放的反相输入端，构成了电压串联负反馈放大电路。不难推导得到：

- 反馈系数  $F = \frac{R_1}{R_1 + R_F}$ ，所以电压增益  $A_{vf} = \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ 。
- 闭环输入电阻  $R_{if} = (1 + AF)R_i$ ，由于集成运放的开环输入电阻  $R_i$  及电路的反馈深度  $D$  均很大，所以闭环输入电阻  $R_{if}$  极大，用一般方法难以测准。
- 由于是电压负反馈且反馈深度很大，所以输出电阻  $R_{of}$  极小，一般可以忽略，即  $R_{of} \approx 0$ 。

设计时首先要根据电压增益的要求确定  $R_F$  与  $R_1$  的比值，之后具体选择  $R_F$  与  $R_1$  的阻值。一般反馈电阻  $R_F$  不宜过大或过小，因为  $R_F$  过大， $R_1$  亦大，输入偏置电流、输入失调电流通过上述电阻会在运放输入端产生较大的附加差模电压，引起较大的输出失调，同时电路分布电容和运算放大器输入电容更加严重的影响电路高频响应和电路稳定性；若  $R_F$  过小， $R_1$  亦小，反馈电路流过的电流较大，增大电路的功耗或超出运算放大器的最大输出电路。一般  $R_F$  为几  $k\Omega$ ~几百  $k\Omega$ 。灵活运用反相和同相比例放大电路就可以构成各种加、减

运算电路。

#### b) 反馈电路带有二极管的同相比例放大器

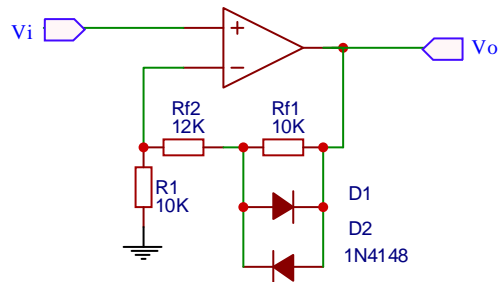


图 2 反馈电路带有二极管的同相比例放大器

如图 2 所示，在同相比例放大器的反馈电阻网络中加入二极管，可以构成增益随输入信号幅度而变的非线性放大器。当输入信号较小时，二极管 D1、D2 不导通，电路的增益为

$$A_{vf} = \frac{1}{F} = 1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_1}$$

，对应图 2 中电路参数，其增益为 3.2。当输入信号增大时，输出信号增大，反馈网络电阻 RF1 上的电压超过并联的二极管 D1 和 D2 的导通电压时，二极管导通，使得电阻 RF1 和二极管并联的等效电阻的阻值下降，电路的增益降低。

#### (2) 由集成运放组成电压比较器

运放的非线性应用是指运放工作在饱和区时的应用。由于运放的线性工作区非常窄，所以当运放处于开环工作或引入正反馈时，运放输入信号“较大”，会超出线性范围，使运放进入饱和区，进入非线性状态，其典型应用电路是由运放组成的电压比较器。下面就分别介绍运放工作在开环和正反馈下的非线性应用。

##### a) 单限电压比较器

典型电路如图 3 所示。运放处于开环状态，所以其工作在非线性区，输出电压仅有  $V_{OH}$  或  $V_{OL}$ 。其中  $V_{REF}$  为基准电压，当  $v_I > V_{REF}$  时， $v_O = V_{OL}$ ；当  $v_I < V_{REF}$  时， $v_O = V_{OH}$ 。其理想传输特性如图 4 所示。

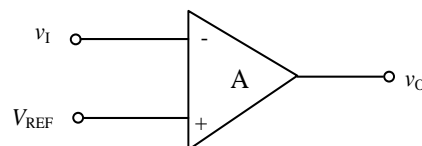


图 3 单限电压比较器

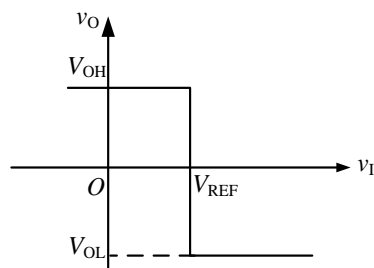


图 4 单限电压比较器的电压传输特性

图中的  $V_{OH}$  即是运放的正向最大输出电压， $V_{OL}$  是运放的反向最大输出电压。 $V_{REF}$  是输出状态发生跃变的转折点，将该转折点的电压称为比较器的阈值电压，一般用  $V_{th}$  表示。上述电路的  $V_{th}=V_{REF}$ 。当  $V_{th}=0$  时的比较器称为过零比较器。

### b) 滞回比较器

上述的电压比较器只有一个阈值电压，每当输入电压变化经过阈值电压时，比较器的输出状态就会改变，所以称为单限电压比较器。若输入信号叠加有较大的干扰，或者输入电压恰好在  $V_{th}$  附近，由于噪声干扰，输出状态会不断发生跳变，故抗干扰能力差。为此采用具有滞回特性的比较器，它有两个阈值电压  $V_{th1}$  和  $V_{th2}$ ，所以又称为双限比较器。同相输入的滞回比较器电路如图 5 所示。放大器的反相输入端接地，输入信号  $v_i$  和电路的输出电压通过电阻  $R_2$ 、 $R_1$  引回到运放的同相输入端，构成正反馈。

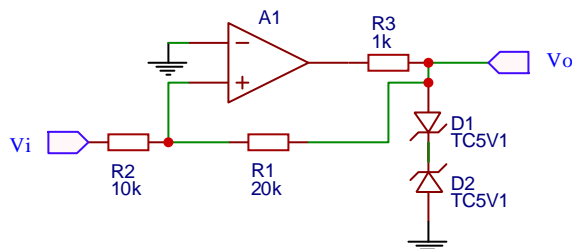


图 5 滞回电压比较器

下面重点分析当输入电压  $v_i$  从较大正值向负值方向变化时电路的传输特性。

i. 当  $v_i$  为数值较大的正电压时，运放处于正向饱和状态，通过  $R_3$  和稳压二极管后电路的输出电压为  $v_o=V_{DZ}$ ， $V_{DZ}$  为稳压二极管的稳定电压。此时运算放大器同相输入端电压  $v_p$

的值为  $v_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DZ}$ 。

ii. 之后  $v_i$  减小，但只要  $v_p > 0$  运放的输出状态不会改变，保持  $v_o=V_{DZ}$  状态不变。

iii. 当  $v_i$  减小，使得  $v_p$  略小于 0，也就是运放的同相输入端电压小于反向输入端电压，

运放输出状态发生跳变,  $v_o = -V_{DZ}$ 。为了确定此时  $v_1$  的值, 我们令  $v_p = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DZ} = 0$ ,

求解得到  $v_i = -\frac{R_2}{R_1} V_{DZ}$ 。即  $V_{th1} = -\frac{R_2}{R_1} V_{DZ}$ 。

iv. 之后再减小  $v_1$ , 仍满足  $v_p < 0$ , 保持  $v_o = -V_{DZ}$  的状态不会改变。

通过上面的分析, 可以得到当输入电压  $v_1$  从较大正值向负值方向变化时电路的传输特性, 如图 6 中左侧分支曲线所示。

类似地, 通过分析可以画出当输入电压  $v_1$  从较大负值向正值方向变化时电路的传输特性, 如图 6 中右侧分支曲线所示。

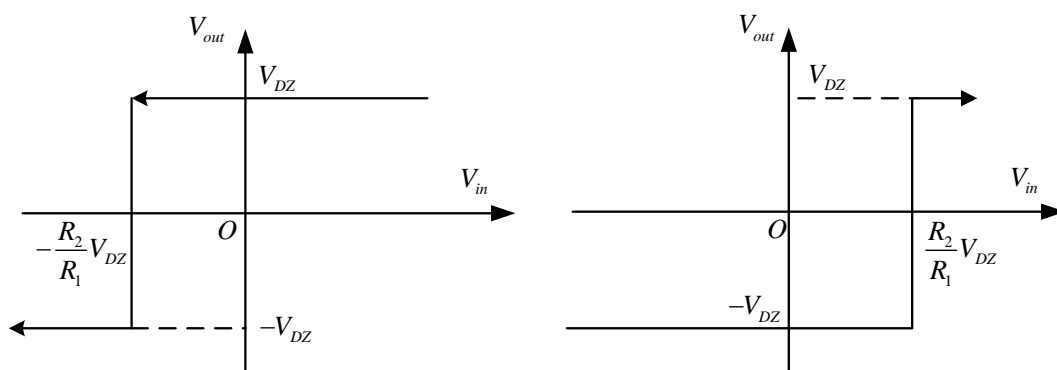


图 6 同相滞回比较器的电压传输特性

可见, 滞回比较器的传输特性有两个分支, 之所以具有滞回特性主要原因是电路引入正反馈, 运放输出状态在  $V_{OH}$  和  $V_{OL}$  之间转换, 使电路具有两个不同的阈值电压。一般将这两个阈值之差  $\Delta V_{th} = V_{th2} - V_{th1}$  称为“回差”电压。

滞回比较器的一个优点就是抗干扰能力强, 只要在跳变点附近输入电压上叠加的干扰电压大小不超过  $\Delta V_{th}$ , 输出电压的值就可保持稳定不变,  $\Delta V_{th}$  越大, 抗干扰能力越强。

### 3. 实验内容

本次实验所用运放为  $\mu A741$ 、 $LF347$  或  $LM324$  等通用集成运算放大器, 电源电压在  $\pm 9V$  到  $\pm 12V$  的范围。

#### (1) 同相比例放大电路的特性测试

实验电路如图 2 所示, 测量电路的交流特性。

输入信号频率为  $1kHz$ , 峰峰值在  $200mV-2V$  范围内的正弦信号, 测量电路在不同输入电压下的电压“增益”(输出电压峰峰值和输入电压峰峰值之比)。绘制“增益”和输入信号

幅度之间关系的曲线。

**(2) 滞回比较器的特性测试**

实验电路如图 5 所示，测量该比较器的传输特性。其中输入信号  $v_i$  为：频率 100Hz，幅度为±6V 的三角波（或正弦波），利用示波器的 XY 模式观测该电路的传输特性曲线，记录两个阈值电压的大小，并与理论值进行比较分析。观察运算放大器同相输入端的波形，并加以解释。

**5. 注意事项**

- (1) 运放的引脚不要接错，电源不要接错接反，注意防止输出引脚对地（或电源）短路，以免损坏器件。
- (2) 图 10 电路在接线时，图中的  $R_3$  电阻不允许不接（短路）。
- (3) 检查电路连接正确后方可接电进行调试。

**6. 预习内容**

- (1) 熟悉运算放大器的原理与应用的有关内容。
- (2) 了解所用运放  $\mu A741$ （或 LF347、LM324）的性能指标和管脚分布。
- (3) 进行相关理论计算或仿真分析，拟定实验方案，并绘制实验记录表格。

**7. 思考题**

- (1) 将预习中的计算结果和实验测试结果相比较，并进行分析讨论。
- (2) 空调温控器的设计

热敏电阻是用半导体材料制造的温度传感器，表 1 给出了某热敏电阻的阻值和温度之间的关系。

温度/ $^{\circ}\text{C}$	22	23	24	25	26	27	28
电阻值/ $\text{k}\Omega$	11.20	10.78	10.38	10.00	9.63	9.28	8.94

表 1 热敏电阻的阻值和温度

黄率同学用这个热敏电阻、电阻和运算放大器构成了一个空调温控器，当房间温度超过 25 $^{\circ}\text{C}$ 时， $V_o$  输出高电压，通过后续的控制电路，驱动空调压缩机工作，实现制冷。请分析这个电路如果用于实际系统，会出现哪些问题？如何改进？

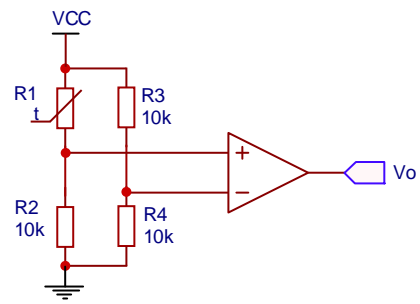


图 7 黄率同学设计的温控器电路