

图 1: LM358，内部集成两个性能一致且独立的运算放大器，图片里的芯片是 DIP 封装，约 8 毫米见方。输出端是 1 脚和 7 脚，同相输入端是 3 脚和 5 脚，8 脚正电源，4 脚负电源

运算放大器简称运放，英文缩写 OPAMP，主要用途是精确地放大电压信号，只要配置合适的外接电阻，可以很容易做到性能接近理想放大器。通过简单的变换，运放也可以放大电流和功率。LM358 是一款廉价通用的芯片，在音频和控制系统里有广泛的应用。

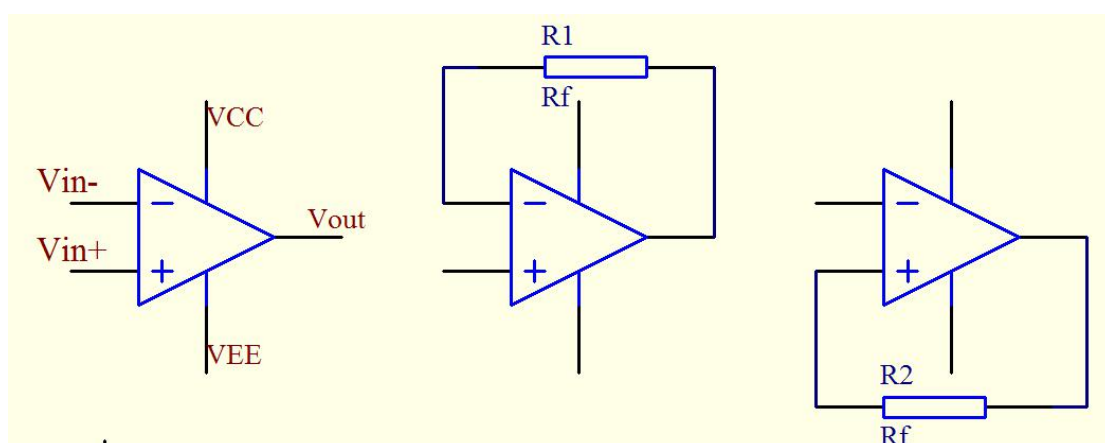


图 2: 运放的电路符号。Vin+是同相输入端，Vin- 是反相输入端，Vcc 是电源正，VEE 是电源负端。有些资料上将 Vin+说成是正输入端是不合适的。中间图，R1 从 Vout 到 Vin-，我们称 R1 是**负**反馈电阻，右图，R2 从 Vout 到 Vin+，我们称 R2 是**正**反馈电阻；如果没有接反馈电阻如左图，我们称运放在开环（比较）状态。

运放的原理有两条黄金法则，只要理解了，运放的所有特性和应用场景都可以被我们理解。

黄金法则 1:

运放的输出端会在电源电压允许的范围内变化输出电压，使两个输入端的电压差为零。这就是两个输入端所谓的“虚短路”，也叫“虚

短”。

黄金法则 2:

在正常工作时，只要两个输入端的电压介于正负电源之间，两个输入端不会有电流出入。就是所谓的“虚断”。

解读法则 1:

1: 运放不会违反欧姆定律，输出不会超出电源电压范围；
2: 输出端会有器件连接到反相输入端（如 R_f ），才有可能改变输入端电压。如果没有器件从输出返回到输入端，也就不会虚短；
3: 开环状态时（图 2 左），同相输入端 V_{in+} （LM358 的 3 脚和 5 脚）反相输入端 V_{in-} （358 的 2,6 脚）的含义是，当 $V_{in+} > V_{in-}$ 时， V_{out} 向电源正端变化，直到接近供电正端；反之， $V_{in+} < V_{in-}$ 时， V_{out} 向电源负端变化，直到接近供电负端。这个变化是个瞬态过程，时间在微秒级，高速运放更快。

4: 运放存在负反馈电阻时，如图 2 中间的 R_1 ，当 $V_{in+} > V_{in-}$ 时， V_{out} 立刻向电源正端变化，直到 $V_{in+} = V_{in-}$ ， V_{out} 会立刻停止变化；这个变化也是个瞬态过程，时间在微秒级。同样，当 $V_{in+} < V_{in-}$ 时， V_{out} 立刻向电源负端变化，直到 $V_{in+} = V_{in-}$ ， V_{out} 会立刻停止变化。

上述是理想的情况。常用的 LM358，输出 V_{out} 向电源正端变化，直到接近供电正端减 1.5V。就是说，如果 LM358 正电源是 10V，输出最高可以到 8.5V。LM358 V_{out} 向电源负端变化电压可以接近供电负端，只差零点几伏。NE5532 的正负输出都会比电源小 1V 左右。目前的轨到轨运放(rail to rail)输入端和输出端都可以接近电源，有些只有数毫伏的差别，性能相当好，如 AD820。

解读法则 2

没有电流出入，也就是阻抗无穷大，实际运放做不到，但是很接近了，LM358 的阻抗在兆欧级别；NE5532 主打低失真和宽频带，输入阻抗略低于 LM358；LF356、AD820 是场效应管输入的运放，输入阻抗在万兆欧级别。

下面用黄金法则推导运放的电压放大倍数：

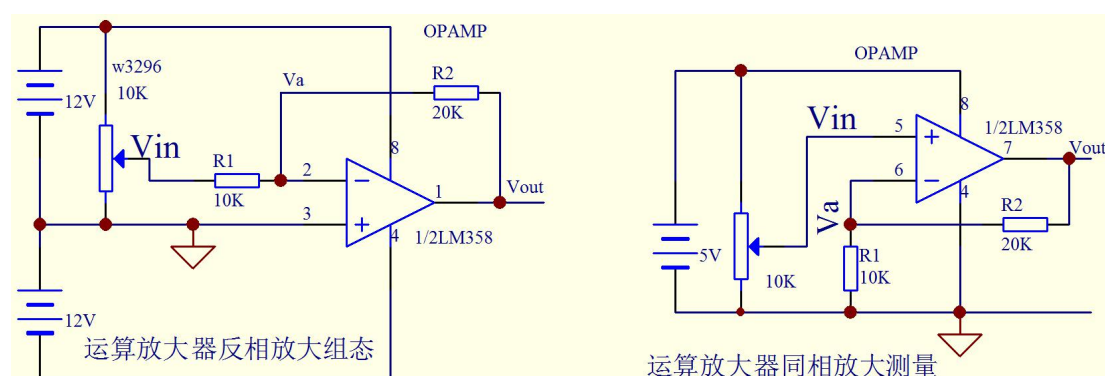


图 3：运放的反相和同相组态的电压放大倍数测量，引脚旁边的数字是芯片引脚号，三角形是接地符号

先推导图 3 左，反相组态的电压放大倍数，反相指输入信号通过 R1 从 Vin- 输入，输出信号的相位和输入信号的相位相反：

根据法则 1：虚短， $V_a = V_{GND} = 0$ ；

根据法则 2：虚断，不会有电流流入流出运算放大器，所以 R1 和 R2 上的电流相同，即： $V_{in}/R1 = -V_{out}/R2$

所以 $K_v = V_{out} / V_{in} = -R2 / R1$ ，

这就是反相组态的电压放大倍数 K_v 的算法。如果 V_{in} 是 +1V， V_{out} 就是 -2V。

问题： $V_{in} = +10V$ ， $V_{out} = ?$

图 3 右，推导同相组态电压放大倍数，指输入信号由同相输入端输入：

根据法则 1： $V_{in} = V_a$ ；

根据欧姆定律，串联电路电流相等和法则 2，R1 和 R2 上的电流相等

$(V_{out} - V_a) / R2 = V_a / R1$

所以 $K_v = V_{out} / V_{in} = 1 + R2 / R1$

这就是同相电压放大倍数 K_v 。按照图 2 上的参数，如果 $V_{in} = 1V$ 则 $V_{out} = 3V$ 。

那么 $V_{in} = +3V$ $V_{out} = ?$

理解上述推导过程可以用直流电压，上述公式中的放大倍数是交直流电压是通用的，运放当然可以放大交流信号，LM358 可以处理 15Khz 以下的正弦信号；而 NE5532 可以工作到数百千赫兹。而且波形不失真，参见示范实验报告部分。

下面来看运放在实际电路里的运用见图 4，这是一个拍手亮灯电路，两个运放在其中做放大器和比较器。

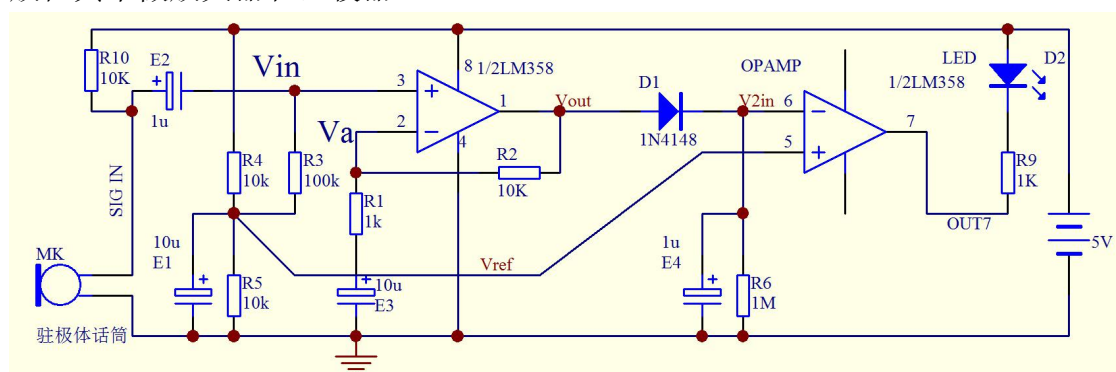


图 4：实际电路里的 LM358.

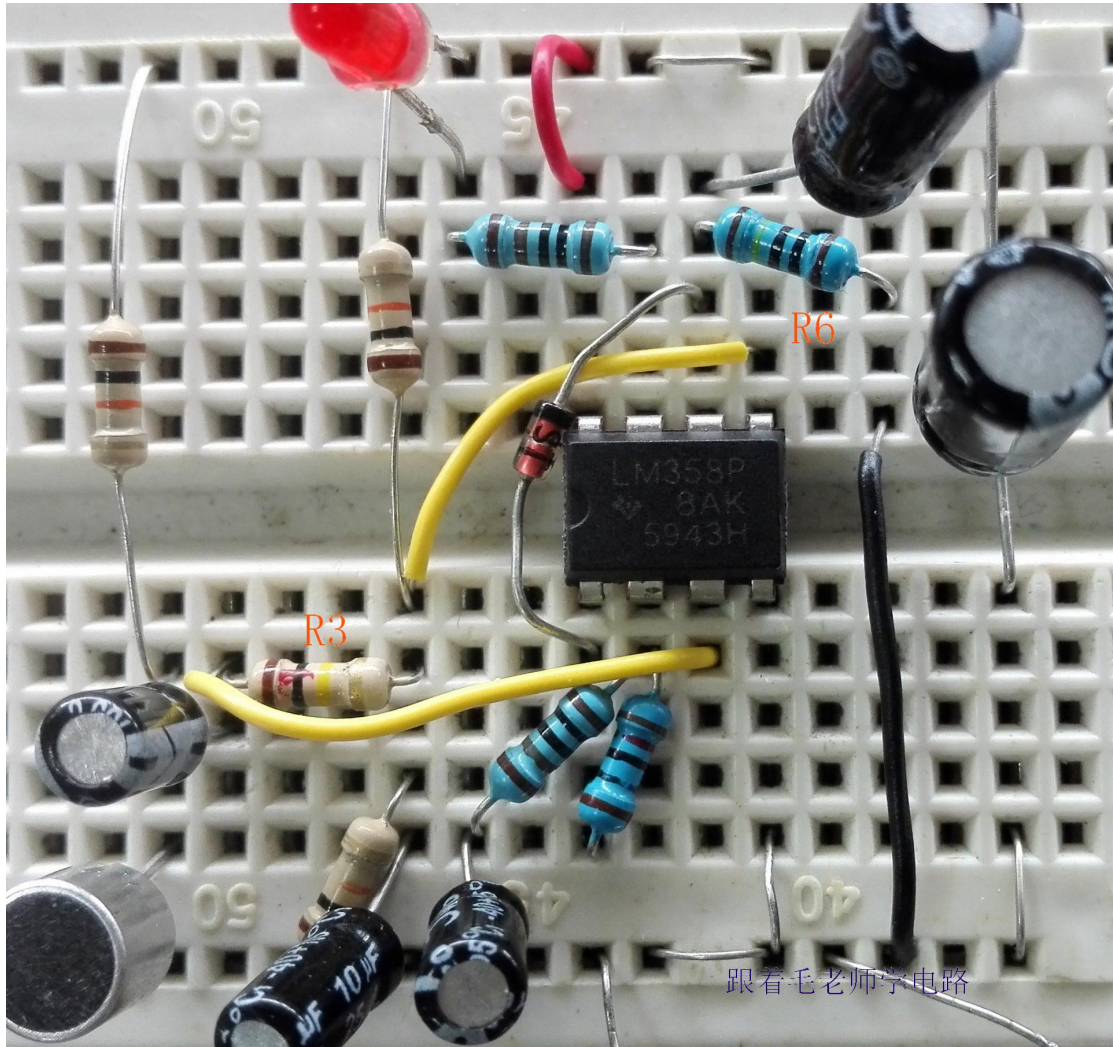


图 5：图 4 电路的实物连接图

图 4 电路的最左面是驻极体话筒，话筒将声音信号转变为电信号，当驻极体话筒在收到一定强度的声音信号后如拍手，其输出的拍手电信号经过左面的运放放大，通过 D1 整流（或称为检波），和右面运放的比较处理，使 LED 点亮一段时间，这段时间长度由 E4 和 R6 决定。

电路里出现了有极性的电容，我们称为电解电容，长脚正极，电容上有明显的正负标识。电容是一个通交流隔直流的器件。不管有没有极性，

电容的容抗 $Z_c = 1/2\pi f c$

频率和容量在分母上，所以我们知道，频率越高，电容量越大，对交流电的阻抗就越小。

图 3 电路左面的运放很明显是同相电压放大组态，因为话筒信号是从同相输入端进去的。

为了分析方便，我们在无话筒输入信号时分析分析各点直流电压；有话筒信号输入时分析交流放大情况。

直流静态情况：这个时候没有声音信号进入， V_{in} 在通过 R3 连接到电源电压的一半 V_{ref} ，根据虚断法则，R3 没有电流通过（当然 5 脚也没有电流出

入)， V_{in} 就是 2.5V。根据同相放大倍数，在直流情况下，电容和电阻都参与了工作，

$$V_{out}/V_{in} = 1 + R_2/(R_1 + Z_c)$$

Z_c 在 $f=0$ 时容抗无穷大，所以左面运放的直流放大倍数是 1。所以无交流信号时 V_{out} 是直流 2.5V。

交流放大模式：假定，话筒收到了 1KHz 的交流信号。上述放大倍数公式仍然有效，我们来算一下容抗，这时 10 微法的 E3 电容容抗只有 15 欧左右，和 R_1 阻值 1K 比可以忽略，所以放大倍数是 11 倍。（严格讲，容抗 Z_c 和电阻不能直接相加，对于 $f = 1\text{kHz}$ ，和 1 千欧比较起来，误差很小）如果同学们希望这个电路听到很远的拍手声就亮灯，请把放大倍数调大试试。

图 3 电路右面的运放输出端没有返回输入端，这是一种开环比较状态，根据法则 1，虚短不成立。根据法则 2，虚断成立。

静态时， $V_{out} = 2.5\text{V}$ ，我们知道 D1 的正向压降 0.7V，所以 $V_{2in} = 1.8\text{V}$ ，而接在同相输入端的 $V_{ref} = 2.5\text{V}$ ，所以法则 1 的解读，OUT7 的电压接近电源正极，对于 LM358，OUT7 的电压在 3.5V 左右，LED 的起始电压大于 1.7V 所以 LED 不亮。

动态时， V_{out} 只要输出瞬态有超过 $2.5+0.7\text{V}$ 的电压， V_{2in} 的电压就会超过 V_{ref} ，就会满足， $V_{in+} < V_{in-}$ 时， V_{out} 向电源负端变化，直到接近供电负端，OUT7 的电压就会到 0 附近（解读法则 1 的第 3 条），LED 被点亮。当 V_{out} 返回 2.5V 以下时，电容 E4 上的电荷无法通过反偏的 D1 放电，只有通过 R6 缓慢释放。所以 LED 会点亮一段时间，约 0.6 秒。（所谓二极管反偏，就是二极管正极电压低于负极电压，二极管像一个无穷大的电阻）请注意如果将图 5 连接图里面 R6,1M 电阻的一个脚悬空，根据运放法则 2 的虚断原理，运放输入端没有电流出入，阻抗无限大，所以 E4 无法放电，拍手后 LED 会亮很长时间，大家可以试试，如果电容不漏电，我们也许可以根据 LED 点亮时间估测 358 的实际输入阻抗。

比较组态的运放也称为比较器，比较器有下面两个描述公式：

$V_{in+} < V_{in-}$ 时， $V_{out} = 0$ （ $V_{out} = V_{ss}$ ，负电源，双电源情况）

$V_{in+} > V_{in-}$ 时， $V_{out} = V_{cc}$

这是理想情况下的，可通过黄金法则推导的。

有一类运放是专门做比较器的，如 LM393，封装和 LM358 一样，引脚分布也相同，只是 393 比较两个输入端的电压速度快，不适合做线性放大器，不可以代替图 3 里的左面的 358，但是可以用 393 代替图 3 右面的那个 358。

前面已经提到过，各类运放对交流信号处理的能力是不一样的，NE5532 速度和失真度指标都要比 LM358 好很多。AD820 的输入阻抗是万兆级，输出可以上下摆动到电源电压。如果图 3 电路用 AD820 代替， R_3 的阻值可以到 1M 或更高。会思考的同学问了，既然虚断了，干嘛要 R_3 ，直接开路得了。确实，有些教科书也会忘记这个 R_3 。再读一遍法则 2 解读，所有真实世界的运放都是有一定的阻抗，很高而已，必须有电阻给提供直流电压，所以，电子工程师认为这个电阻的存在是天经地义的，只有从来没有摸过真实运放的人才会漏掉这个

R3。做实验把 R3 去掉看看什么感觉？

查手册时要关注一个指标 SR (Slew rate)，如 AD820，是 $3.0\text{V}/\mu\text{s}$ ，表示这个运放的输出端每微秒可以上 3.0V 。LM358 大概是 $0.3\text{V}/\mu\text{s}$ 。这个数据越大，处理高频信号能力越强。

好了，运放讲完了。大家可以实际测量手边运放的放大倍数，输入阻抗和对高频信号的处理能力。