

运算放大器组成的电路五花八门，令人眼花缭乱，是模拟电路中学习的重点。在分析它的工作原理时倘没有抓住核心，往往令人头大。为此本人特搜罗天下运放电路之应用，来个“庖丁解牛”，希望各位从事电路板维修的同行，看完后有所斩获。遍观所有模拟电子技术的书籍和课程，在介绍运算放大器电路的时候，无非是先给电路来个定性，比如这是一个同向放大器，然后去推导它的输出与输入的关系，然后得出 $V_o = (1+R_f)V_i$ ，那是一个反向放大器，然后得出 $V_o = -R_f \cdot V_i$ ……最后学生往往得出这样一个印象：记住公式就可以了！如果我们将电路稍稍变换一下，他们就找不着北了！偶曾经面试过至少 100 个以上的大专以上学历的电子专业应聘者，结果能将我给出的运算放大器电路分析得一点不错的没有超过 10 个人！其它专业毕业的更是可想而知了。

今天，芯片级维修教各位战无不胜的两招，这两招在所有运放电路的教材里都写得明白，就是“虚短”和“虚断”，不过要把它运用得出神入化，就要有较深厚的功底了。

虚短和虚断的概念

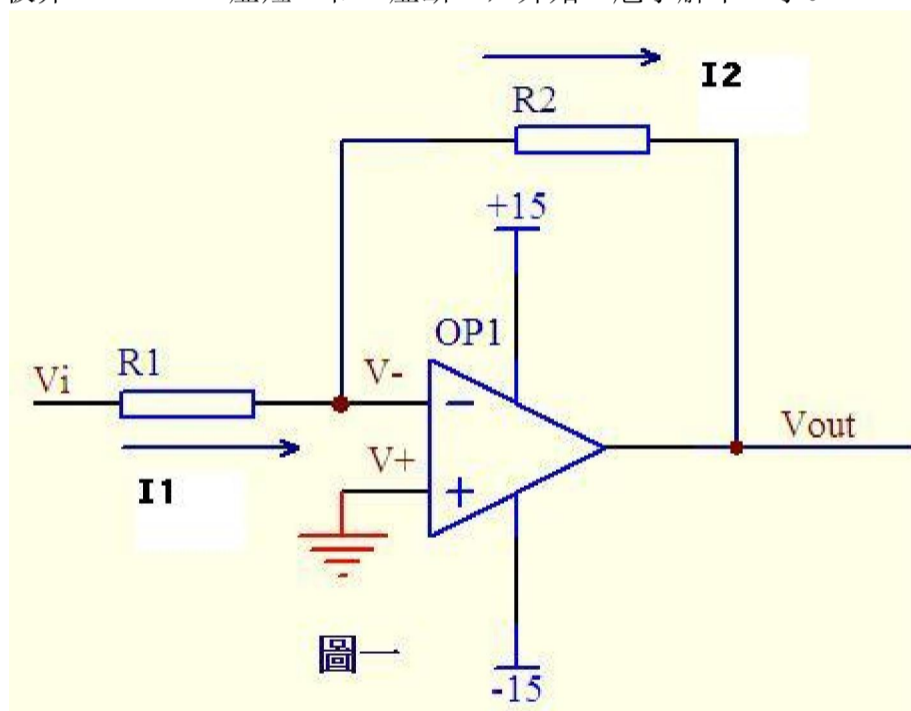
由于运放的电压放大倍数很大，一般通用型运算放大器的开环电压放大倍数都在 80 dB 以上。而运放的输出电压是有限的，一般在 10 V~14 V。因此运放的差模输入电压不足 1 mV，两输入端近似等电位，相当于“短路”。开环电压放大倍数越大，两输入端的电位越接近相等。

“虚短”是指在分析运算放大器处于线性状态时，可把两输入端视为等电位，这一特性称为虚假短路，简称虚短。显然不能将两输入端真正短路。

由于运放的差模输入电阻很大，一般通用型运算放大器的输入电阻都在 $1M\Omega$ 以上。因此流入运放输入端的电流往往不足 1 μA ，远小于输入端外电路的电流。故通常可把运放的两输入端视为开路，且输入电阻越大，两输入端越接近开路。“虚断”是指在分析运放处于线性状态时，可以把两输入端视为等效开路，这一特性称为虚假开路，简称虚断。显然不能将两输入端真正断路。

在分析运放电路工作原理时，首先请各位暂时忘掉什么同向放大、反向放大，什么加法器、减法器，什么差动输入……暂时忘掉那些输入输出关系的公式……这些东东只会干扰你，让你更糊涂；也请各位暂时不要理会输入偏置电流、共模抑制比、失调电压等电路参数，这是设计者要考虑的事情。我们理解的就是理想放大器（其实在维修中和大多数设计过程中，把实际放大器当做理想放大器来分析也不会有问题）。

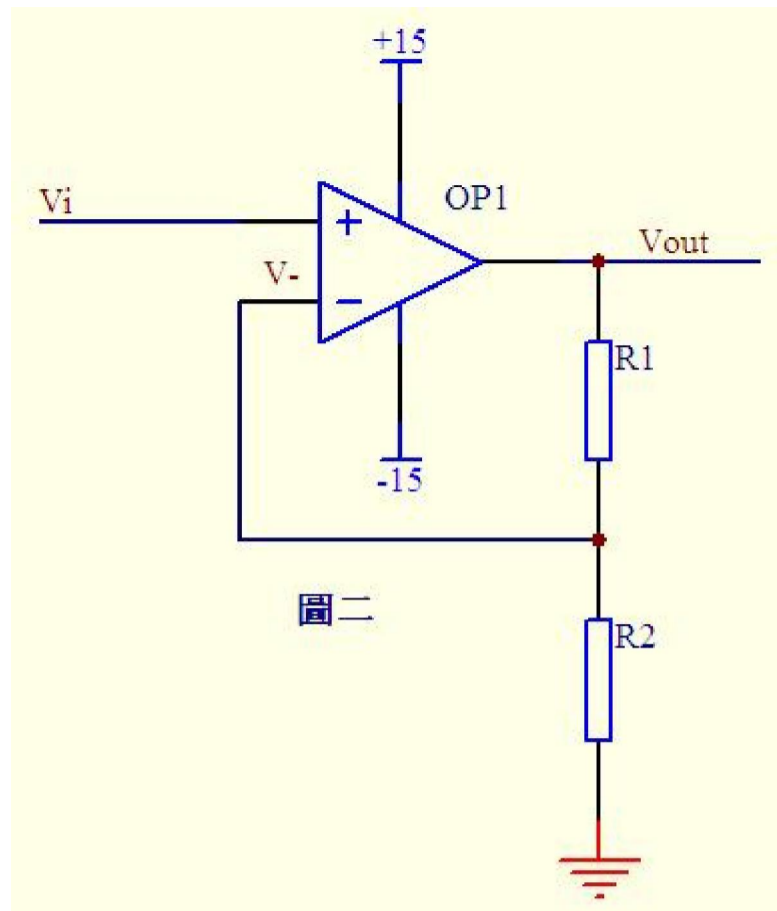
好了，让我们抓过两把“板斧”——“虚短”和“虚断”，开始“庖丁解牛”了。



(原文件名:1. jpg)

[引用图片](#)

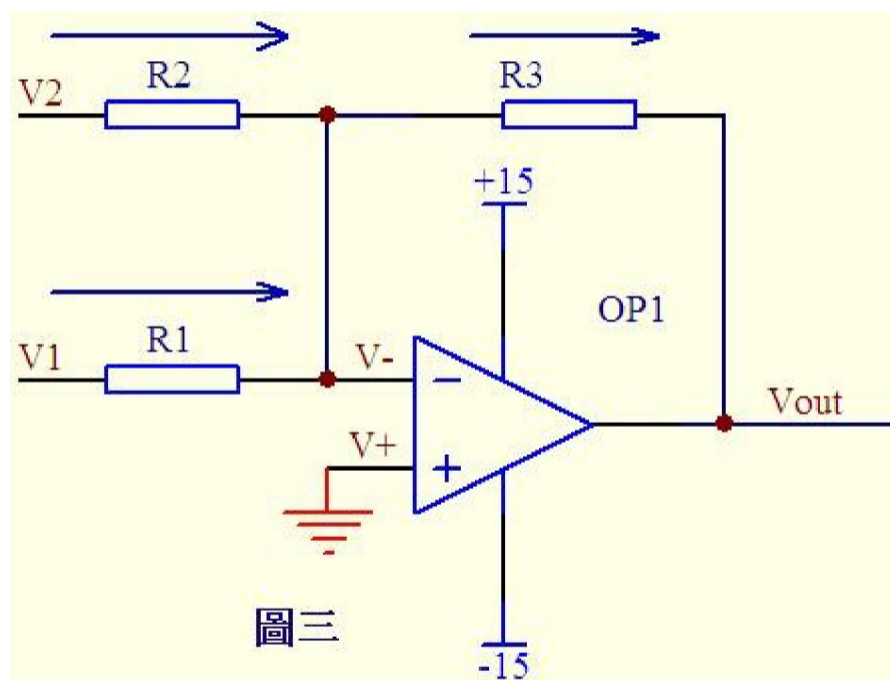
图一运放的同向端接地=0V，反向端和同向端虚短，所以也是 0V，反向输入端输入电阻很高，虚断，几乎没有电流注入和流出，那么 R1 和 R2 相当于是串联的，流过一个串联电路中的每一只组件的电流是相同的，即流过 R1 的电流和流过 R2 的电流是相同的。流过 R1 的电流 $I_1 = (V_i - V_-)/R_1$ ……a 流过 R2 的电流 $I_2 = (V_- - V_{out})/R_2$ ……b $V_- = V_+ = 0$ ……c $I_1 = I_2$ ……d 求解上面的初中代数方程得 $V_{out} = (-R_2/R_1) \cdot V_i$ 这就是传说中的反向放大器的输入输出关系式了。



(原文件名:2. jpg)

[引用图片](#)

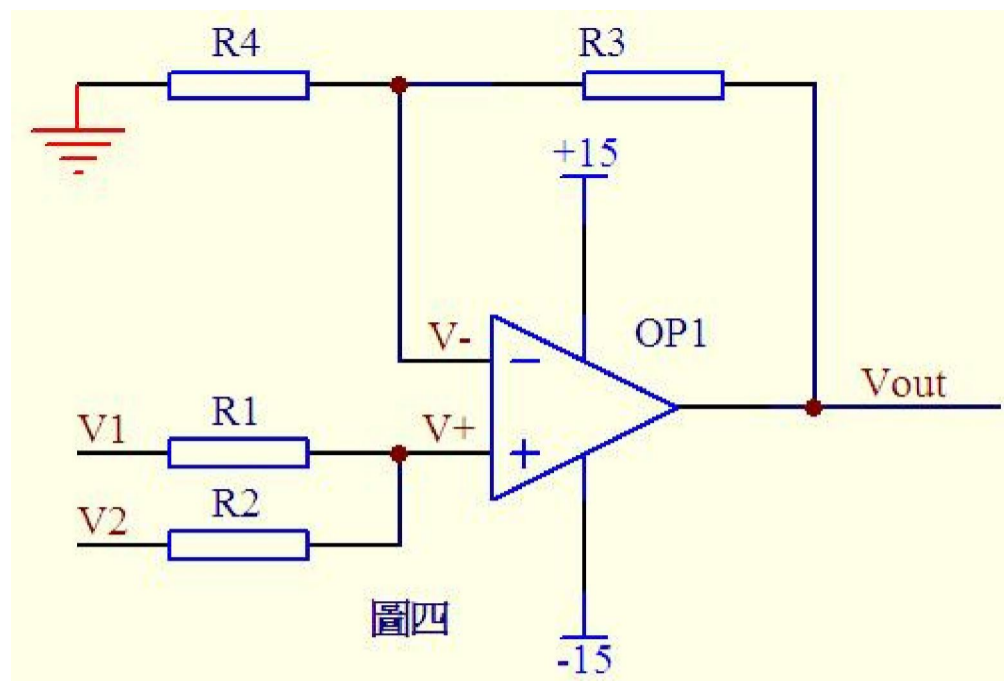
图二中 V_i 与 V_- 虚短，则 $V_i = V_-$ ……a 因为虚断，反向输入端没有电流输入输出，通过 R_1 和 R_2 的电流相等，设此电流为 I ，由欧姆定律得： $I = V_{out} / (R_1 + R_2)$ ……b V_i 等于 R_2 上的分压，即： $V_i = I * R_2$ ……c 由 abc 式得 $V_{out} = V_i * (R_1 + R_2) / R_2$ 这就是传说中的同向放大器的公式了。



(原文件名:3. jpg)

[引用图片](#)

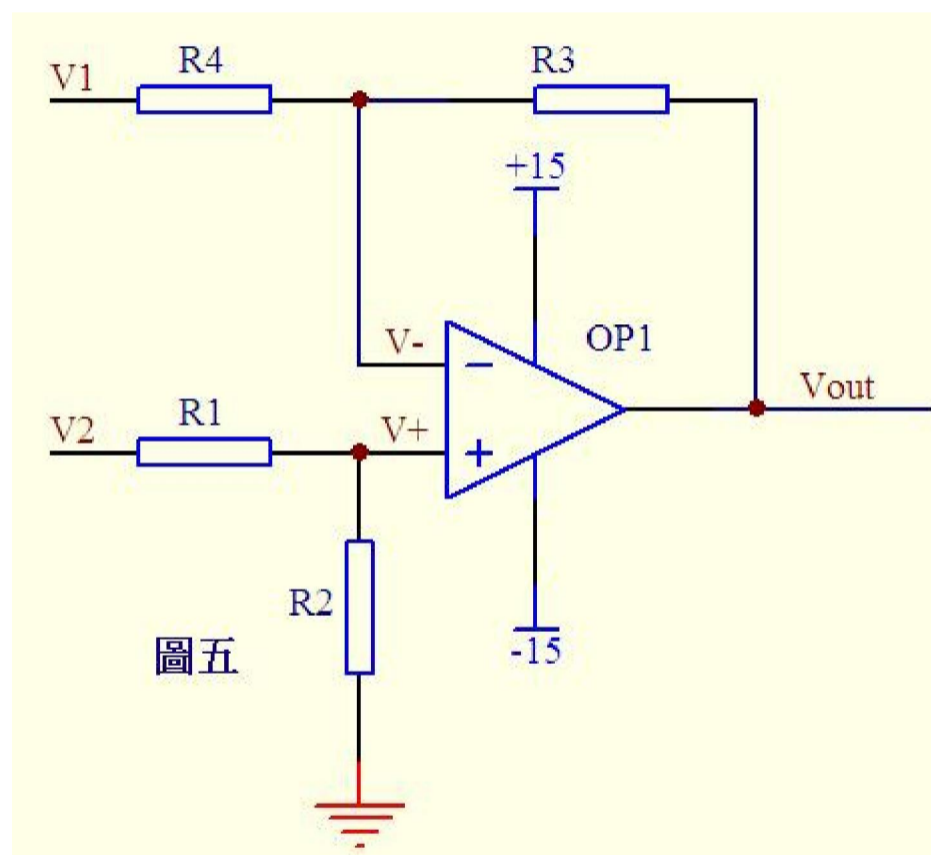
图三中，由虚短知： $V_- = V_+ = 0$ ……a 由虚断及基尔霍夫定律知，通过 R_2 与 R_1 的电流之和等于通过 R_3 的电流，故 $(V_1 - V_-) / R_1 + (V_2 - V_-) / R_2 = (V_{out} - V_-) / R_3$ ……b 代入 a 式，b 式变为 $V_1 / R_1 + V_2 / R_2 = V_{out} / R_3$ 如果取 $R_1 = R_2 = R_3$ ，则上式变为 $V_{out} = V_1 + V_2$ ，这就是传说中的加法器了。



(原文件名:4. jpg)

[引用图片](#)

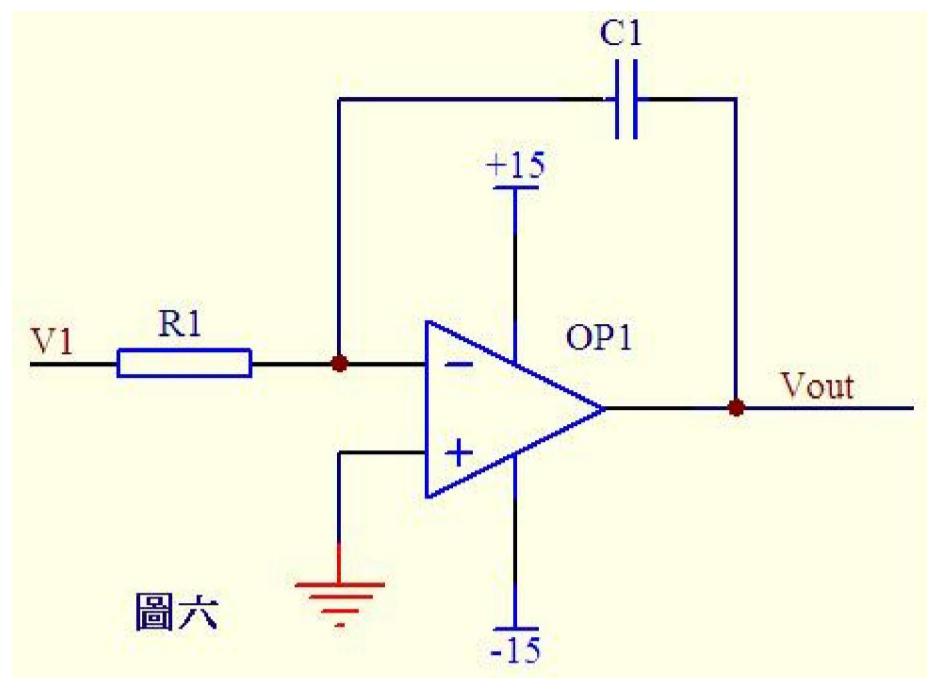
请看图四。因为虚断，运放同向端没有电流流过，则流过 R1 和 R2 的电流相等，同理流过 R4 和 R3 的电流也相等。故 $(V1 - V+)/R1 = (V+ - V2)/R2$ a $(Vout - V-)/R3 = V-/R4$ b 由虚短知: $V+ = V-$ c 如果 $R1=R2$, $R3=R4$, 则由以上式子可以推导出 $V+ = (V1 + V2)/2$ $V- = Vout/2$ 故 $Vout = V1 + V2$ 也是一个加法器，呵呵！



(原文件名:5. jpg)

[引用图片](#)

图五由虚断知，通过 R1 的电流等于通过 R2 的电流，同理通过 R4 的电流等于 R3 的电流，故有 $(V2 - V+)/R1 = V+/R2$ a $(V1 - V-)/R4 = (V- - Vout)/R3$ b 如果 $R1=R2$, 则 $V+ = V2/2$ c 如果 $R3=R4$, 则 $V- = (Vout + V1)/2$ d 由虚短知 $V+ = V-$ e 所以 $Vout=V2-V1$ 这就是传说中的减法器了。

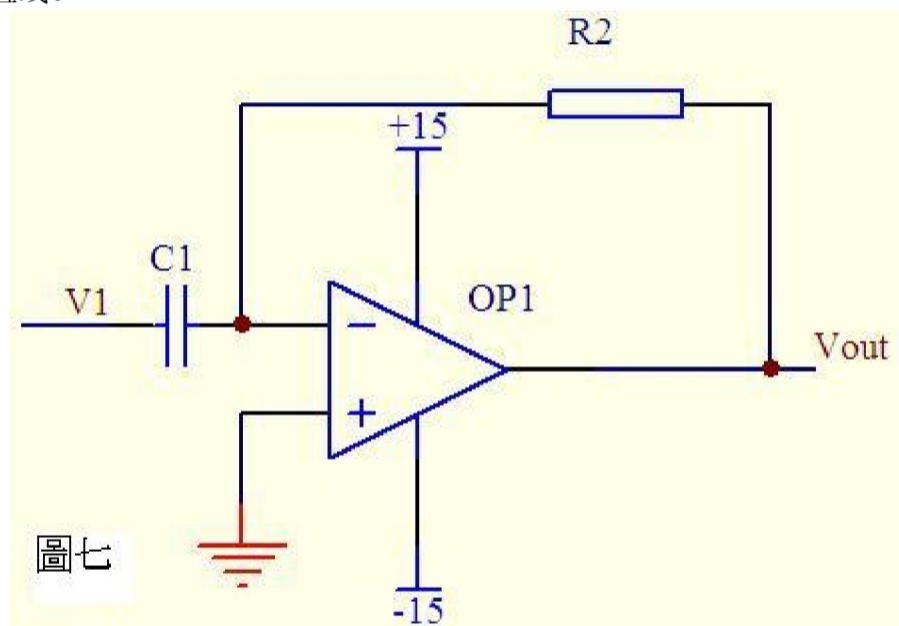


圖六

(原文件名:6. jpg)

[引用图片](#)

图六电路中，由虚短知，反向输入端的电压与同向端相等，由虚断知，通过 R1 的电流与通过 C1 的电流相等。通过 R1 的电流 $i = V1/R1$ 通过 C1 的电流 $i = C \cdot dU_c/dt = -C \cdot dV_{out}/dt$ 所以 $V_{out} = ((-1/(R1 \cdot C1)) \int V1 dt$ 输出电压与输入电压对时间的积分成正比，这就是传说中的积分电路了。若 V1 为恒定电压 U，则上式变换为 $V_{out} = -U \cdot t / (R1 \cdot C1)$ t 是时间，则 Vout 输出电压是一条从 0 至负电源电压按时间变化的直线。

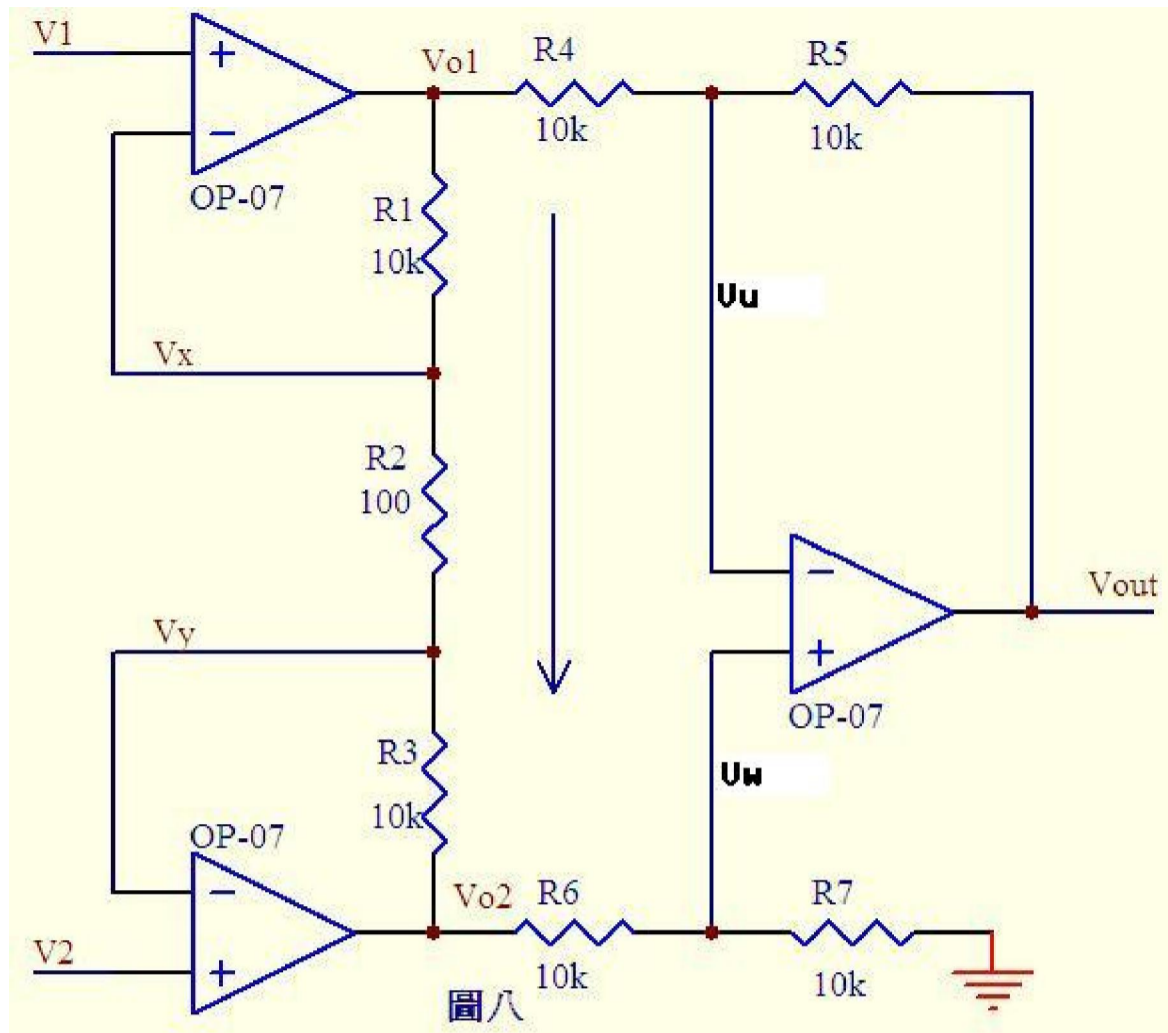


圖七

(原文件名:7. jpg)

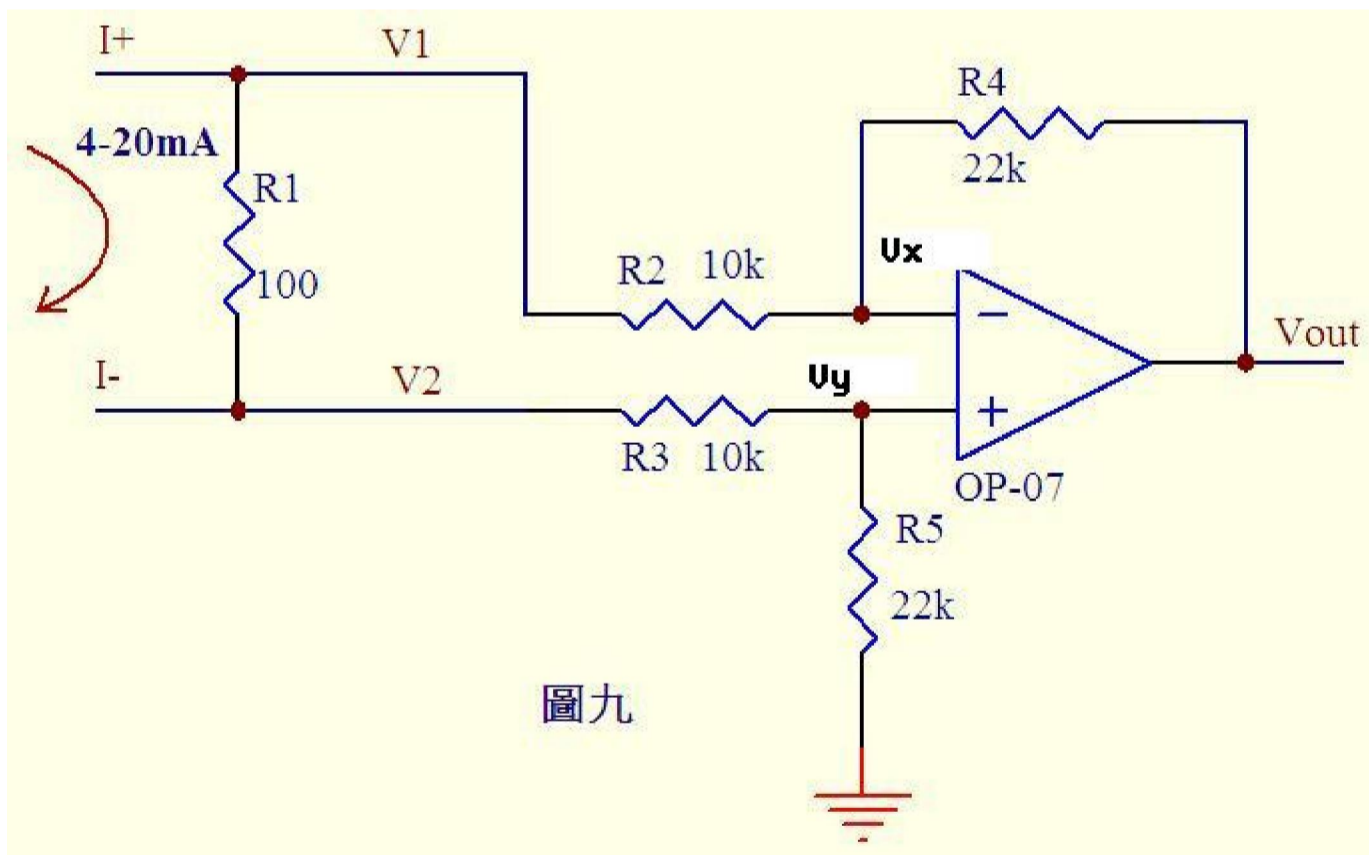
[引用图片](#)

图七中由虚断知，通过电容 C1 和电阻 R2 的电流是相等的，由虚短知，运放同向端与反向端电压是相等的。则： $V_{out} = -i \cdot R2 = -(R2 \cdot C1) dV1/dt$ 这是一个微分电路。如果 V1 是一个突然加入的直流电压，则输出 Vout 对应一个方向与 V1 相反的脉冲。



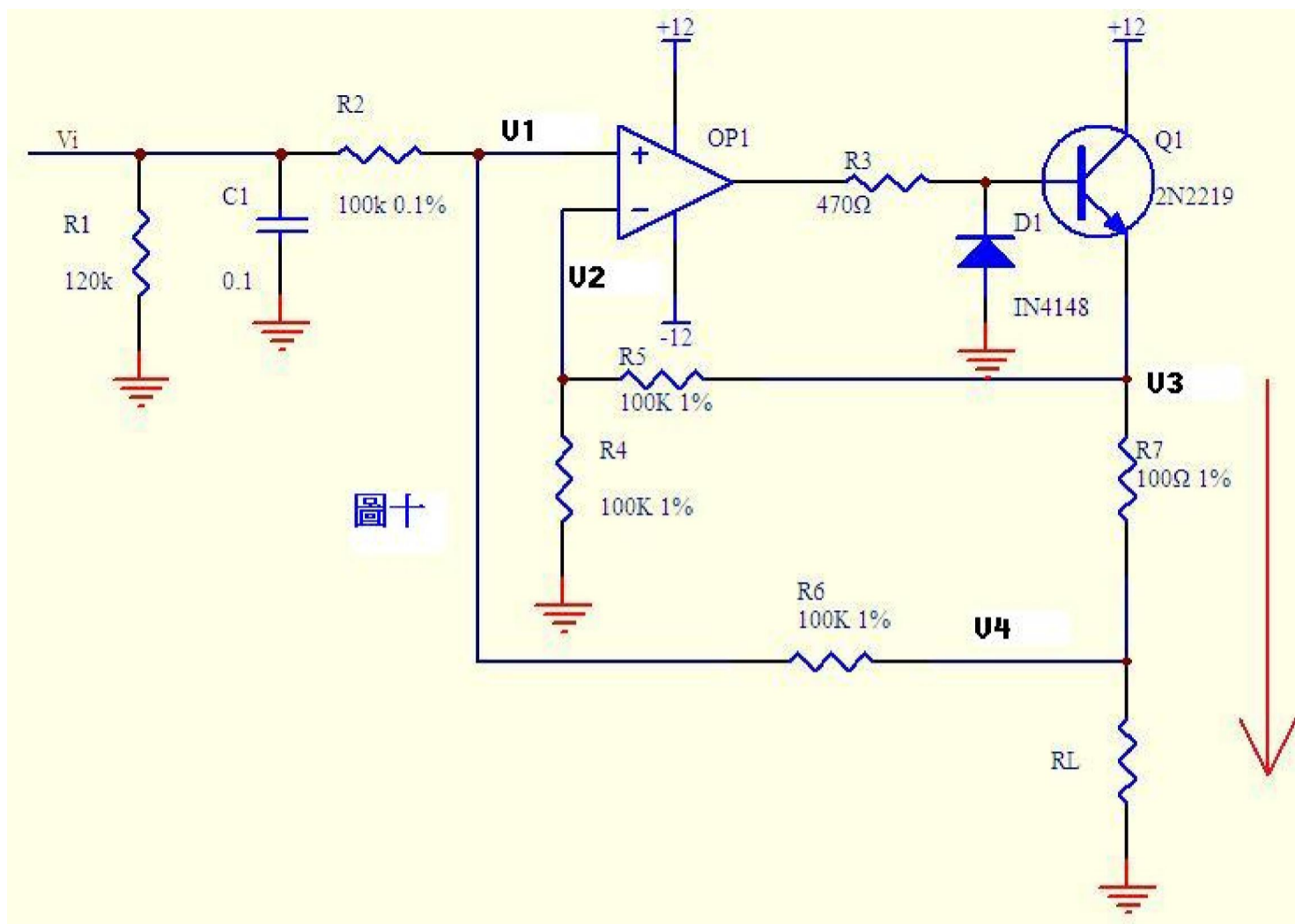
(原文件名:8. jpg)
引用图片

图八. 由虚短知 $V_x = V_1$ a $V_y = V_2$ b 由虚断知, 运放输入端没有电流流过, 则 R_1 、 R_2 、 R_3 可视为串联, 通过每一个电阻的电流是相同的, 电流 $I = (V_x - V_y) / R_2$ c 则: $V_{o1} - V_{o2} = I * (R_1 + R_2 + R_3) = (V_x - V_y) (R_1 + R_2 + R_3) / R_2$ d 由虚断知, 流过 R_6 与流过 R_7 的电流相等, 若 $R_6 = R_7$, 则 $V_w = V_{o2} / 2$ e 同理若 $R_4 = R_5$, 则 $V_{out} - V_u = V_u - V_{o1}$, 故 $V_u = (V_{out} + V_{o1}) / 2$ f 由虚短知, $V_u = V_w$ g 由efg得 $V_{out} = V_{o2} - V_{o1}$ h 由dh得 $V_{out} = (V_y - V_x) (R_1 + R_2 + R_3) / R_2$ 上式中 $(R_1 + R_2 + R_3) / R_2$ 是定值, 此值确定了差值 $(V_y - V_x)$ 的放大倍数。这个电路就是传说中的差分放大电路了。



(原文件名:9. jpg)
引用图片

分析一个大家接触得较多的电路。很多控制器接受来自各种检测仪表的 $0 \sim 20\text{mA}$ 或 $4 \sim 20\text{mA}$ 电流, 电路将此电流转换成电压后再送 ADC 转换成数字信号, 图九就是这样一个典型电路。如图 $4 \sim 20\text{mA}$ 电流流过采样 100Ω 电阻 R_1 , 在 R_1 上会产生 $0.4 \sim 2\text{V}$ 的电压差。由虚断知, 运放输入端没有电流流过, 则流过 R_3 和 R_5 的电流相等, 流过 R_2 和 R_4 的电流相等。故: $(V_2 - V_y) / R_3 = V_x / R_5$ a $(V_1 - V_x) / R_2 = (V_x - V_{out}) / R_4$ b 由虚短知: $V_x = V_y$ c 电流从 $0 \sim 20\text{mA}$ 变化, 则 $V_1 = V_2 + (0.4 \sim 2)$ d 由cd式代入b式得 $(V_2 + (0.4 \sim 2) - V_y) / R_2 = (V_y - V_{out}) / R_4$ e 如果 $R_3 = R_2$, $R_4 = R_5$, 则由e-a得 $V_{out} = -(0.4 \sim 2) R_4 / R_2$ f 图九中 $R_4 / R_2 = 22\text{k} / 10\text{k} = 2.2$, 则f式 $V_{out} = -(0.88 \sim 4.4)\text{V}$, 即是说, 将 $4 \sim 20\text{mA}$ 电流转换成了 $-0.88 \sim -4.4\text{V}$ 电压, 此电压可以送 ADC 去处理。



(原文件名:10. jpg)
引用图片

电流可以转换成电压，电压也可以转换成电流。图十就是这样一个电路。上图的负反馈没有通过电阻直接反馈，而是串联了三极管 Q1 的发射结，大家可不要以为是一个比较器就是了。只要是放大电路，虚短虚断的规律仍然是符合的！

由虚断知，运放输入端没有电流流过，

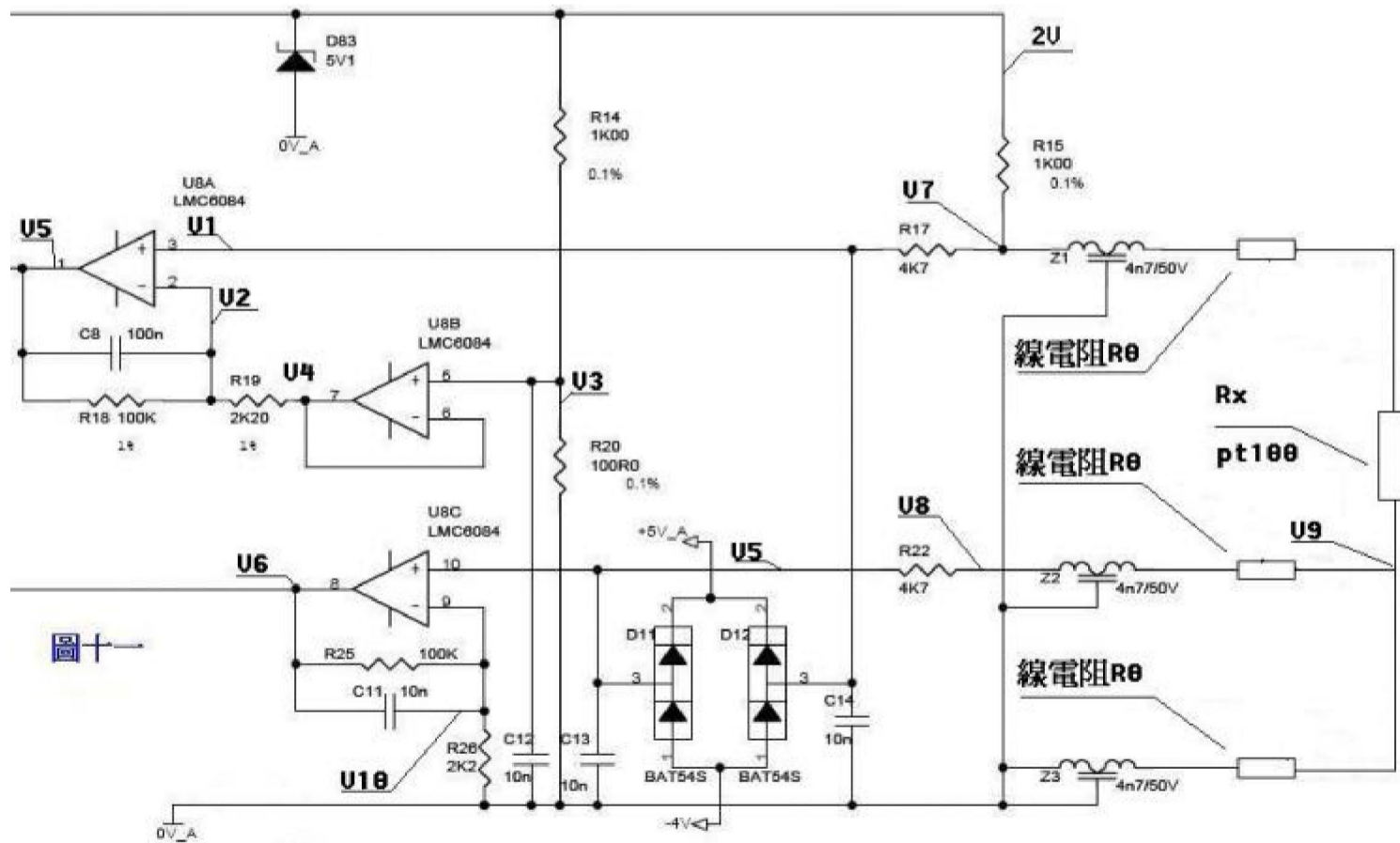
$$\text{则} \quad (V_i - V_1)/R_2 = (V_1 - V_4)/R_6 \quad \dots\dots a$$

$$\text{同理} \quad (V_3 - V_2)/R_5 = V_2/R_4 \quad \dots\dots b$$

$$\text{由虚短知} \quad V_1 = V_2 \quad \dots\dots c$$

如果 $R_2=R_6$, $R_4=R_5$, 则由 abc 式得 $V_3-V_4=V_i$

上式说明 R7 两端的电压和输入电压 V_i 相等，则通过 R7 的电流 $I=V_i/R_7$ ，如果负载 $R_L \ll 100K \Omega$ ，则通过 R1 和通过 R7 的电流基本相同。



(原文件名:11. jpg)
引用图片

来一个复杂的，呵呵！图十一是一个三线制 PT100 前置放大电路。PT100 传感器引出三根材质、线径、长度完全相同的线，接法如图所示。有 2V 的电压加在由 R14、R20、R15、Z1、PT100 及其线电阻组成的桥电路上。Z1、Z2、Z3、D11、D12、D83 及各电容在电路中起滤波和保护作用，静态分析时可不予理会，Z1、Z2、Z3 可视为短路，D11、D12、D83 及各电容可视为开路。由电阻分压知， $V_3=2 \cdot R_{20} / (R_{14} + 20) = 200 / 1100 = 2 / 11 \dots\dots a$ 由虚短知，U8B 第 6、7 脚电压和第 5 脚电压相等 $V_4=V_3 \dots\dots b$ 由

虚断知，U8A 第 2 脚没有电流流过，则流过 R18 和 R19 上的电流相等。 $(V_2-V_4)/R_{19}=(V_5-V_2)/R_{18}$ ……c 由虚断知，U8A 第 3 脚没有电流流过， $V_1=V_7$ ……d 在桥电路中 R15 和 Z1、PT100 及线电阻串联，PT100 与线电阻串联分得的电压通过电阻 R17 加至 U8A 的第 3 脚， $V_7=2*(R_x+2R_0)/(R_{15}+R_x+2R_0)$ ……e 由虚短知，U8A 第 3 脚和第 2 脚电压相等， $V_1=V_2$ ……f 由 abcdef 得

$$(V_5-V_7)/100=(V_7-V_3)/2.2$$

化简得 $V_5=(102.2*V_7-100V_3)/2.2$ 即 $V_5=204.4(R_x+2R_0)/(1000+R_x+2R_0) - 200/11$ ……g 上式输出电压 V5 是 Rx 的函数我们再看线电阻的影响。Pt100 最下端线电阻上产生的电压降经过中间的线电阻、Z2、R22，加至 U8C 的第 10 脚，由虚断知， $V_5=V_8=V_9=2*R_0/(R_{15}+R_x+2R_0)$ ……a $(V_6-V_{10})/R_{25}=V_{10}/R_{26}$ ……b 由虚短知， $V_{10}=V_5$ ……c 由式 abc 得 $V_6=(102.2/2.2)V_5=204.4R_0/[2.2(1000+R_x+2R_0)]$ ……h 由式 gh 组成的方程组知，如果测出 V5、V6 的值，就可算出 Rx 及 R0，知道 Rx，查 pt100 分度表就知道温度的大小了。