

从虚断，虚短分析基本运放电路

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 $V_o=-R_f*V_i$ ……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！

今天，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。

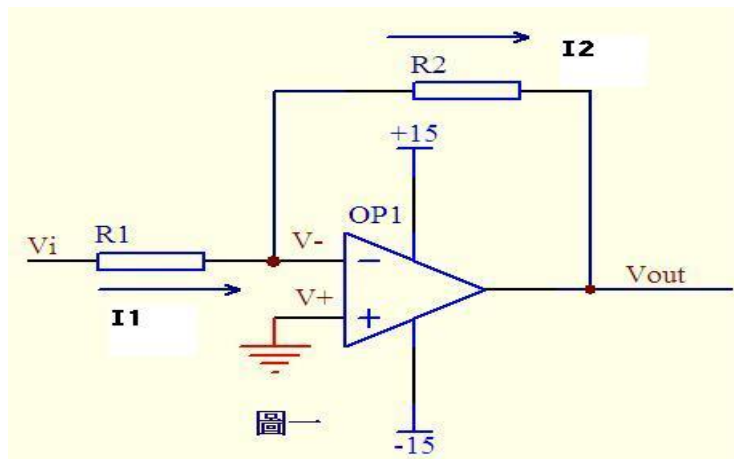
由于运放的差模输入电阻很大，一般通用型运算放大器的输入电阻都在 $1M\Omega$ 以上。因此流入运放输入端的电流往往不足 1 μ A，远小于输入端外电路的电流。故通常可把运放的两输入端视为开路，且输入电阻越大，两输入端越接

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。

1) 反向放大器:



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。

$$\text{流过 } R1 \text{ 的电流: } I1 = (Vi - V-)/R1 \dots\dots\dots a$$

$$\text{流过 } R2 \text{ 的电流: } I2 = (V- - Vout)/R2 \dots\dots\dots b$$

$$V- = V+ = 0 \dots\dots\dots c$$

$$I1 = I2 \dots\dots\dots d$$

求解上面的初中代数方程得 $V_{out} = (-R_2/R_1)*V_i$

这就是传说中的反向放大器的输入输出关系式了。

2) 同向放大器:

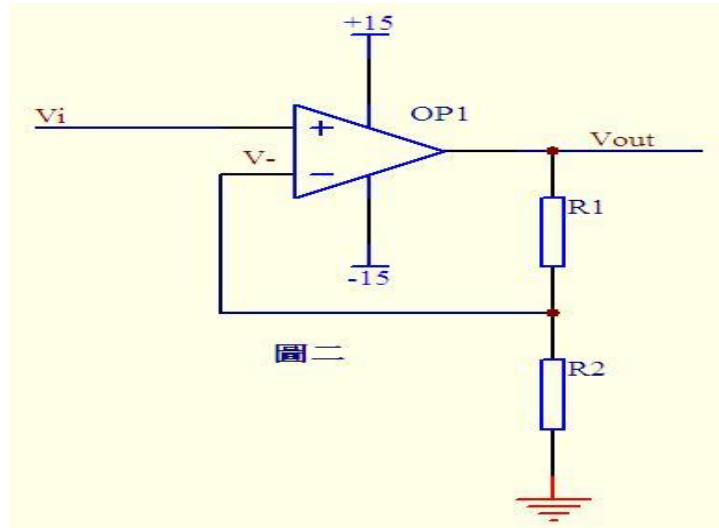


图 2

图二中 V_i 与 V_- 虚短, 则 $V_i = V_- \dots\dots a$

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: $I = V_{out}/(R_1+R_2) \dots\dots b$

V_i 等于 R_2 上的分压, 即: $V_i = I*R_2 \dots\dots c$

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。

3) 加法器 1:

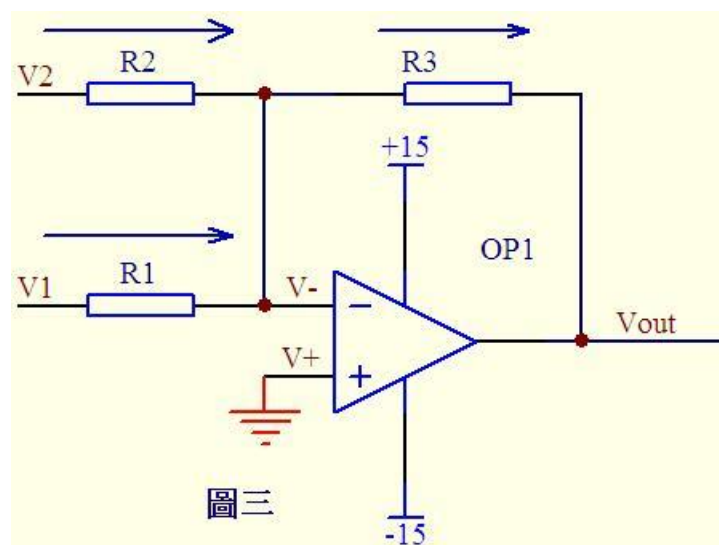


图 3

图三中, 由虚短知: $V_- = V_+ = 0 \dots\dots a$

由虚断及基尔霍夫定律知,通过 R2 与 R1 的电流之和等于通过 R3 的电流,故 $(V_1 - V_-)/R_1 + (V_2 - V_-)/R_2 = (V_- - V_{out})/R_3 \dots\dots b$

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。

4) 加法器 2:

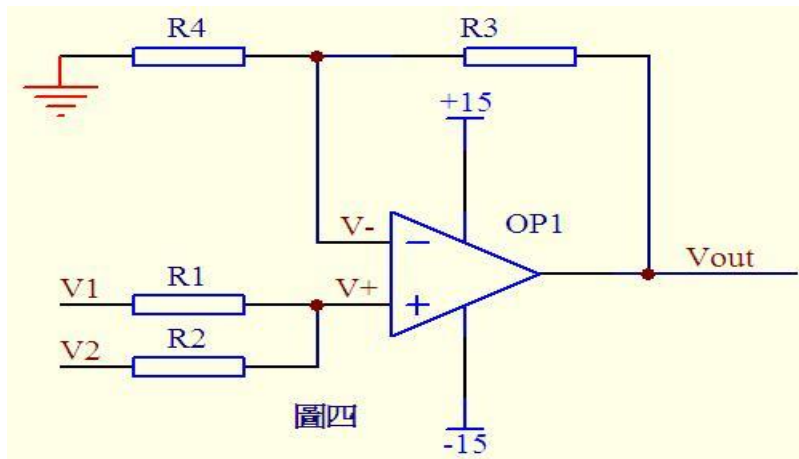


图 4

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 $(V_1 - V_+)/R_1 = (V_+ - V_2)/R_2 \dots\dots a$

$(V_{out} - V_-)/R_3 = V_-/R_4 \dots\dots b$

由虚短知: $V_+ = V_- \dots\dots c$ 如果 $R_1=R_2, R_3=R_4$, 则由以上式子可以推导出 $V_+ = (V_1 + V_2)/2, V_- = V_{out}/2$ 故 $V_{out} = V_1 + V_2$ 也是一个加法器, 呵呵!

5) 減法器

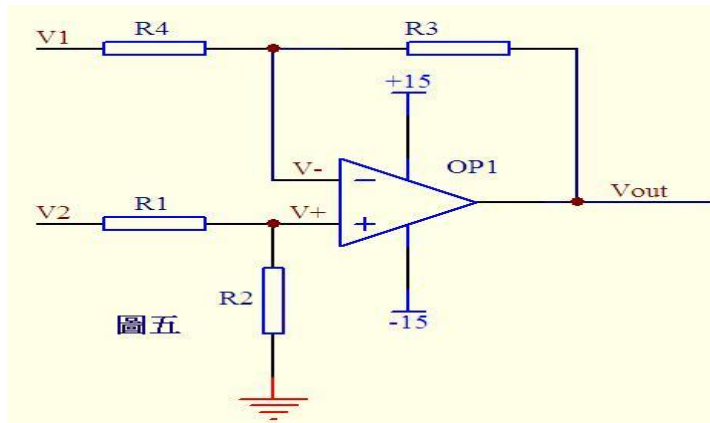


图 5

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 $(V2 - V+)/R1 = V+/R2 \dots\dots a$

$$(V1 - V-)/R4 = (V- - Vout)/R3 \dots\dots b$$

$$\text{如果 } R1=R2, \text{ 则 } V+ = V2/2 \dots\dots c$$

$$\text{如果 } R3=R4, \text{ 则 } V- = (Vout + V1)/2 \dots\dots d$$

$$\text{由虚短知 } V+ = V- \dots\dots e$$

所以 $Vout=V2-V1$ 这就是传说中的減法器了。

6) 积分电路:

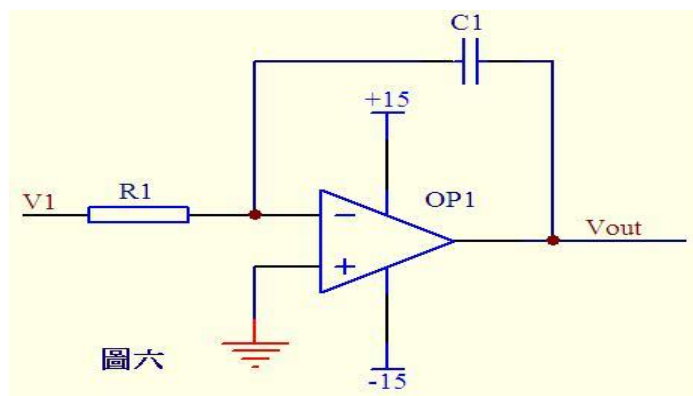


图 6

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 $i=C*dUc/dt=-C*dVout/dt$

所以 $Vout = ((-1/(R1*C1)) \int V1dt$ 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 $Vout = -U*t/(R1*C1)$ 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。

7) 微分电路:

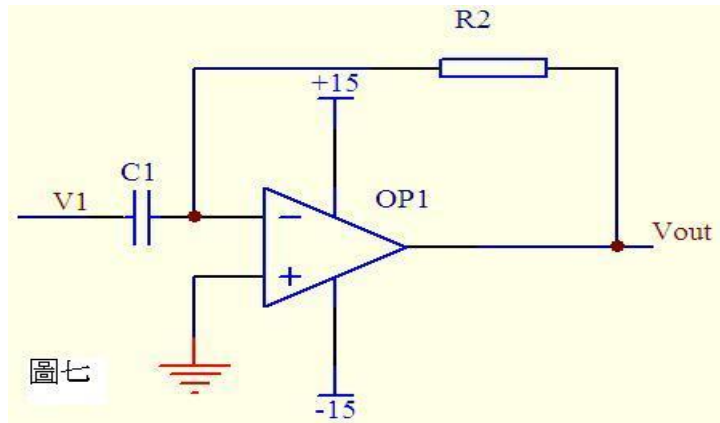


图 7

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： $Vout = -i * R2 = -(R2*C1) dV1/dt$

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。

8) 差分放大电路

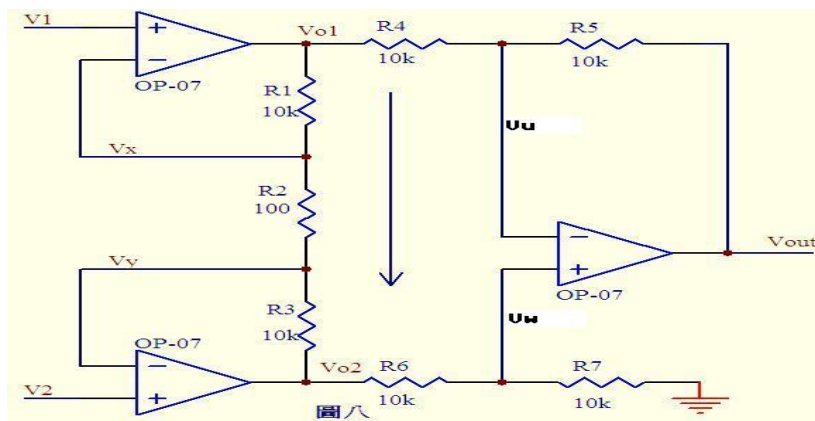


图 8

由虚短知 $V_x = V_1 \dots\dots a$

$V_y = V_2 \dots\dots b$

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 $I = (V_x - V_y) / R_2 \dots\dots c$

则： $V_{o1} - V_{o2} = I * (R_1 + R_2 + R_3) = (V_x - V_y) (R_1 + R_2 + R_3) / R_2 \dots\dots d$

由虚断知，流过 R_6 与流过 R_7 的电流相等, 若 $R_6 = R_7$ ， 则 $V_w = V_{o2} / 2 \dots\dots e$

同理若 $R_4 = R_5$ ， 则 $V_{out} - V_u = V_u - V_{o1}$ ， 故 $V_u = (V_{out} + V_{o1}) / 2 \dots\dots f$

由虚短知， $V_u = V_w \dots\dots g$

由 efg 得 $V_{out} = V_{o2} - V_{o1} \dots\dots h$

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。

9) 电流检测：

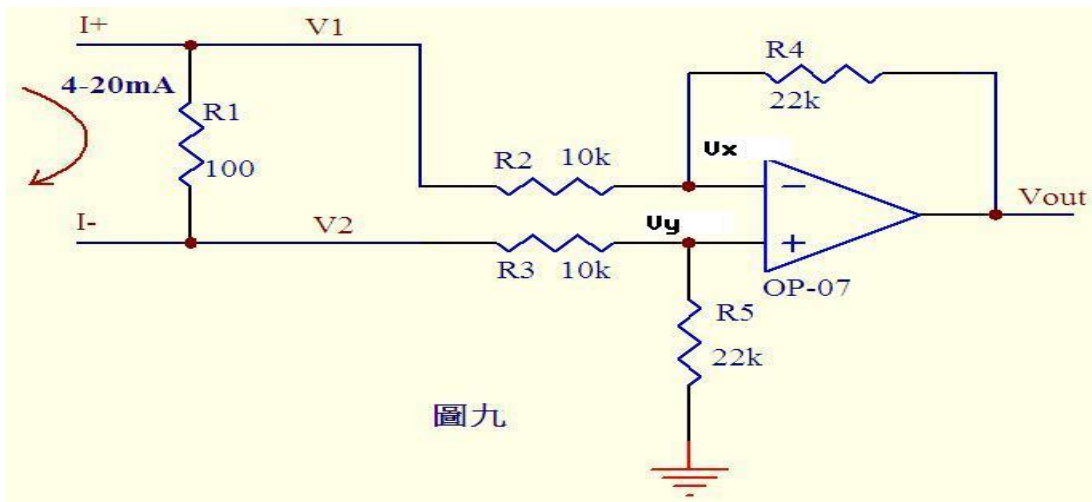


图 9

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

R1 上会产生 $0.4 \sim 2V$ 的电压差。由虚断知，运放输入端没有电流流过，则流过 R3 和 R5 的电流相等，流过 R2 和 R4 的电流相等。故：

$$(V_2 - V_y) / R_3 = V_y / R_5 \dots\dots a$$

$$(V_1 - V_x) / R_2 = (V_x - V_{out}) / R_4 \dots\dots b$$

由虚短知： $V_x = V_y \dots\dots c$

电流从 $0 \sim 20mA$ 变化，则 $V_1 = V_2 + (0.4 \sim 2) \dots\dots d$

由 cd 式代入 b 式得 $(V_2 + (0.4 \sim 2) - V_y) / R_2 = (V_y - V_{out}) / R_4 \dots\dots e$

如果 $R_3 = R_2$ ， $R_4 = R_5$ ，则由 e-a 得 $V_{out} = -(0.4 \sim 2) R_4 / R_2 \dots\dots f$

图九中 $R_4 / R_2 = 22k / 10k = 2.2$ ，则 f 式 $V_{out} = -(0.88 \sim 4.4)V$ ，

即是说，将 $4 \sim 20mA$ 电流转换成了 $-0.88 \sim -4.4V$ 电压，此电压可以送 ADC 去处理。

注：若将图九电流反接既得 $V_{out} = +(0.88 \sim 4.4)V$ ，

10) 电压电流转换检测:

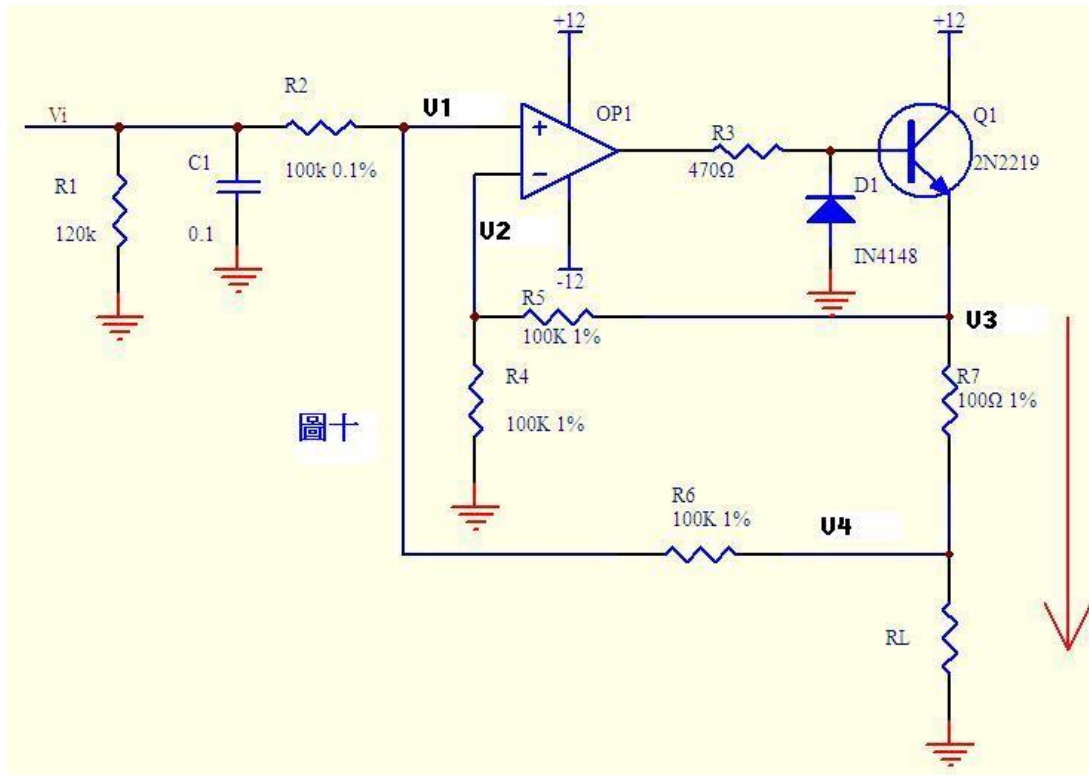


图 10

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，

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

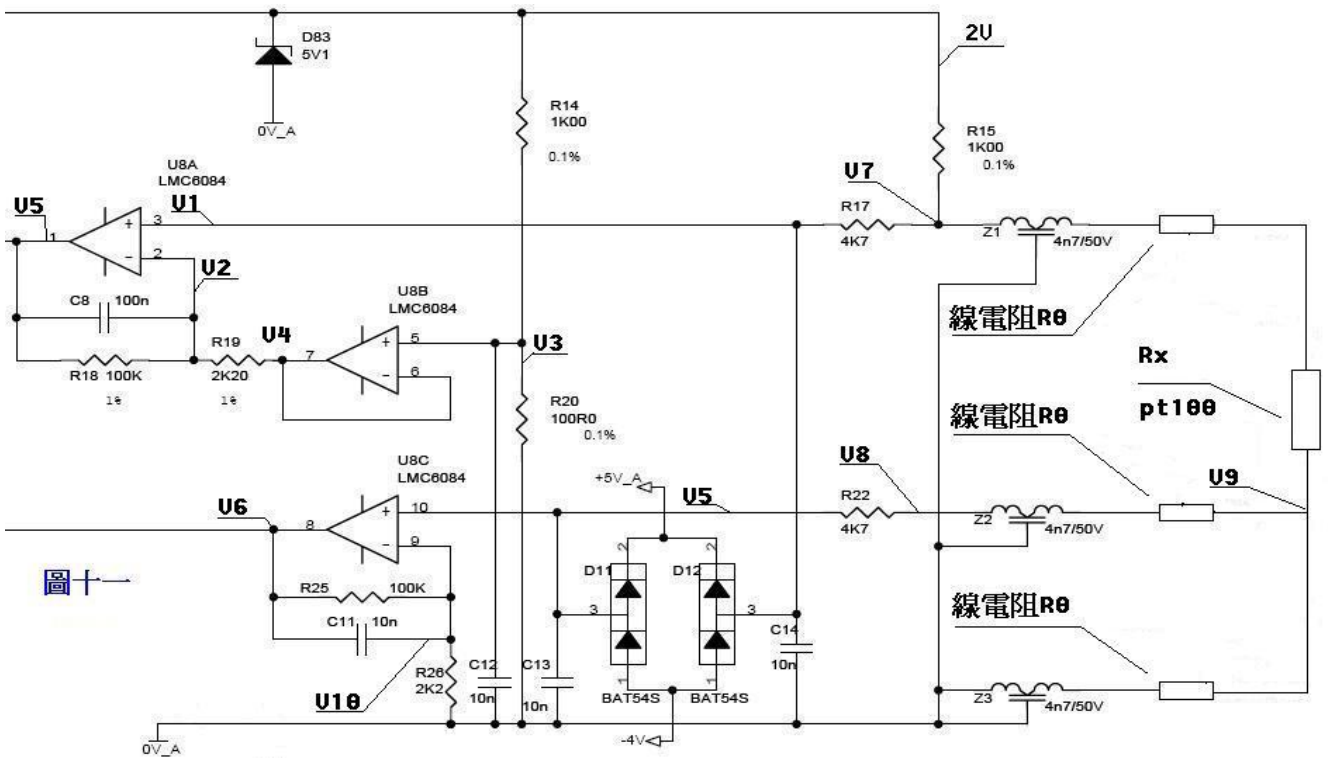
同理
$$(V_3 - V_2)/R_5 = V_2/R_4 \quad \dots\dots b$$

由虚短知
$$V_1 = V_2 \quad \dots\dots c$$

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。

11) 传感器检测:



圖十一

图 11

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， $V_3 = 2 * R_{20} / (R_{14} + 20) = 200 / 1100 = 2 / 11 \dots\dots a$

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。

$$(V_2 - V_4) / R_{19} = (V_5 - V_2) / R_{18} \dots\dots c$$

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 R_x 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

$$(V_6-V_{10})/R_{25}=V_{10}/R_{26} \text{b}$$

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 R_x 及 R₀, 知道 R_x, 查 pt100 分度表就知道温度的大小了。