

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。

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。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, 看完后有所收获。

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! 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。

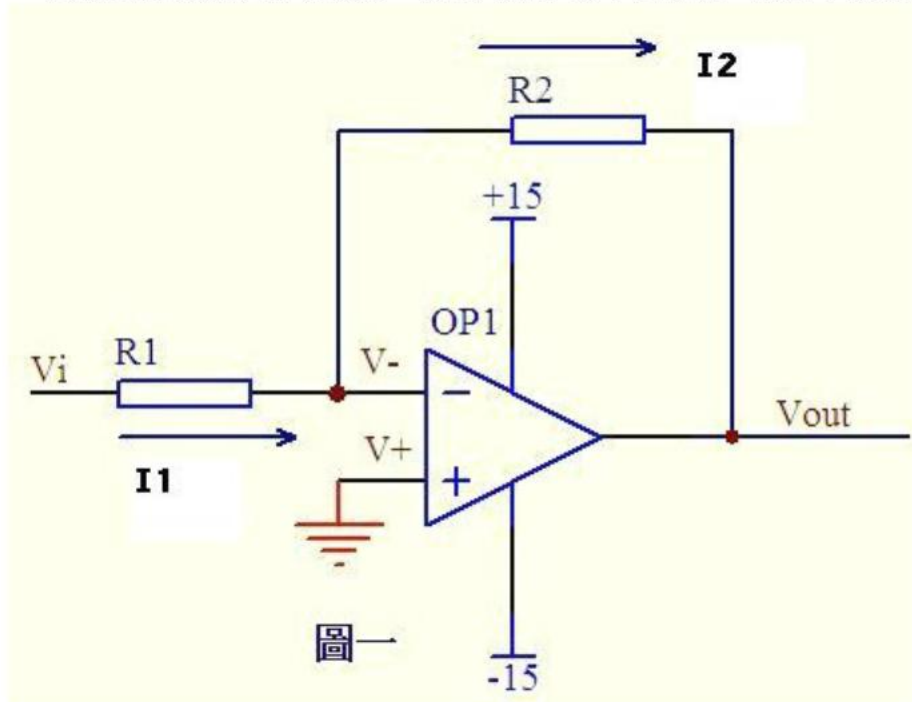
“虚短”是指在分析运算放大器处于线性状态时, 可把两输入端视为等电位, 这一特性称为虚假短路, 简称虚短。显然不能将两输入端真正短路。

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1MΩ以上。因此流入运放输入端的电流往往不足1μA, 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。

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。

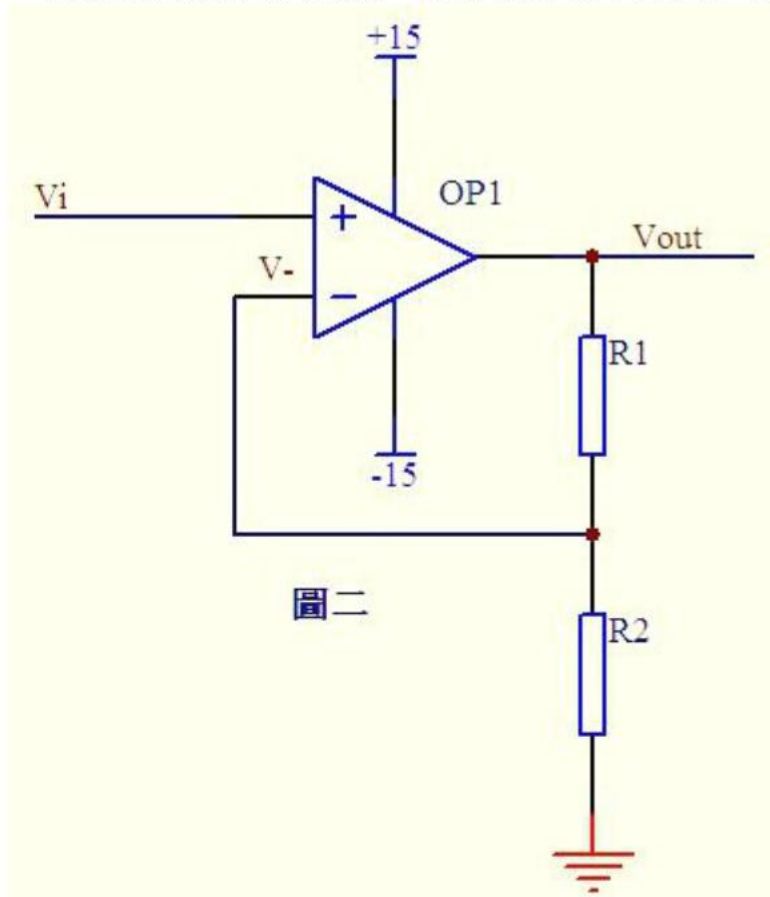


想看后面详细部分（共11个经典电路），还请麻烦回复一下吧~~

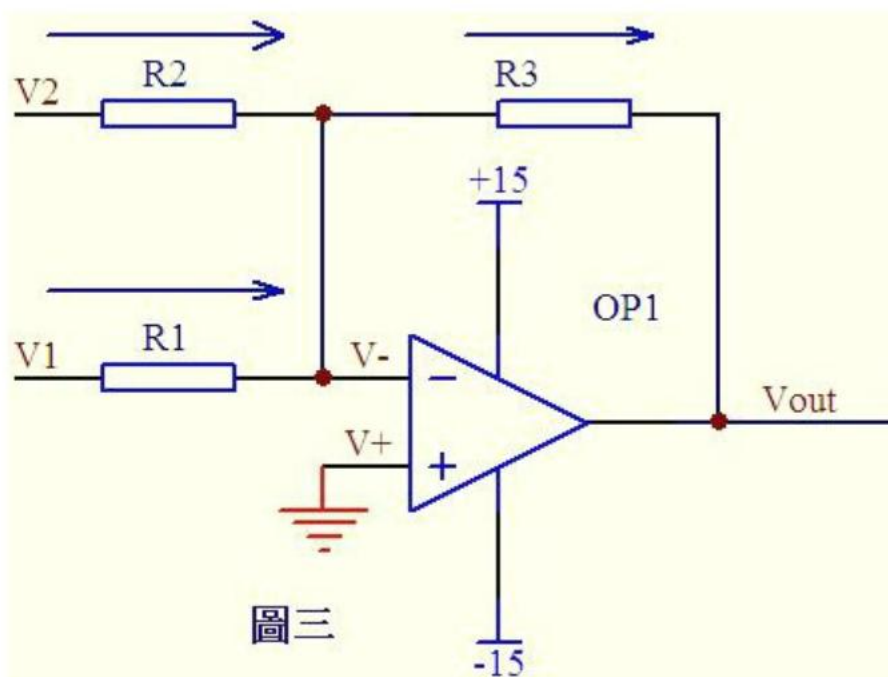
——回复可见——

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  $I1 = (Vi - V-)/R1$  .....a 流过 R2的电流  $I2 = (V- - Vout)/R2$  .....b  $V- = V+ = 0$  .....c  $I1 = I2$  .....d 求解上面的初中代数方程得  $Vout = (-R2/R1)*Vi$  这就是传说中的反向放大器的输入输出关系式了。

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



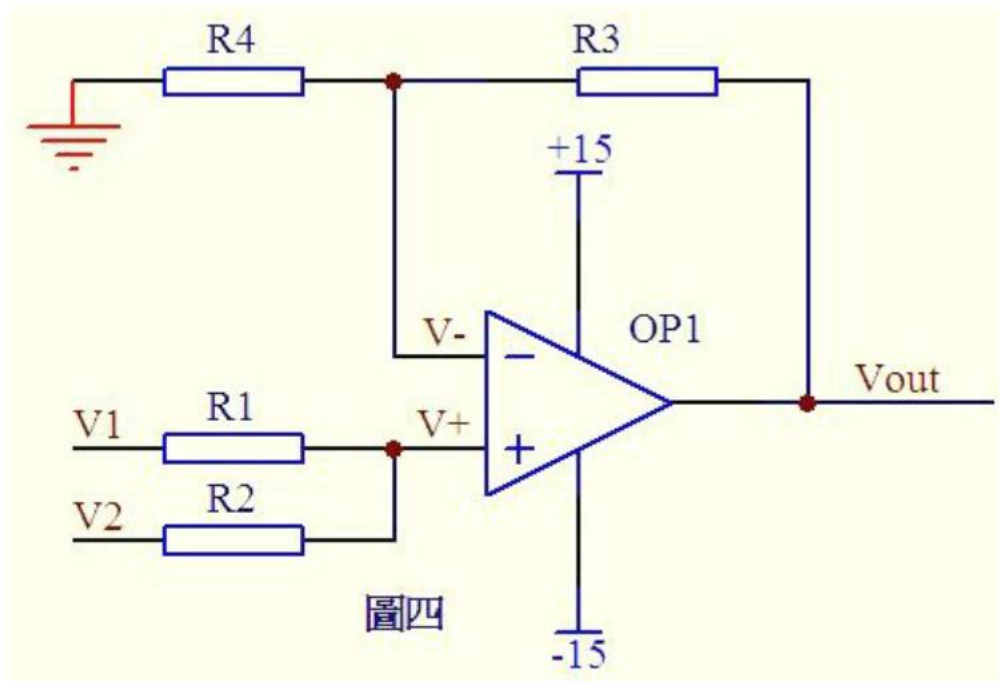
图二中  $V_i$  与  $V_-$  虚短, 则  $V_i = V_- \dots\dots a$  因为虚断, 反向输入端没有电流输入输出, 通过  $R_1$  和  $R_2$  的电流相等, 设此电流为  $I$ , 由欧姆定律得:  $I = V_{out} / (R_1 + R_2) \dots\dots b$   $V_i$  等于  $R_2$  上的分压, 即:  $V_i = I \cdot R_2 \dots\dots c$  由  $abc$  式得  $V_{out} = V_i \cdot (R_1 + R_2) / R_2$  这就是传说中的同向放大器的公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



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  $R_2$  与  $R_1$  的电流之

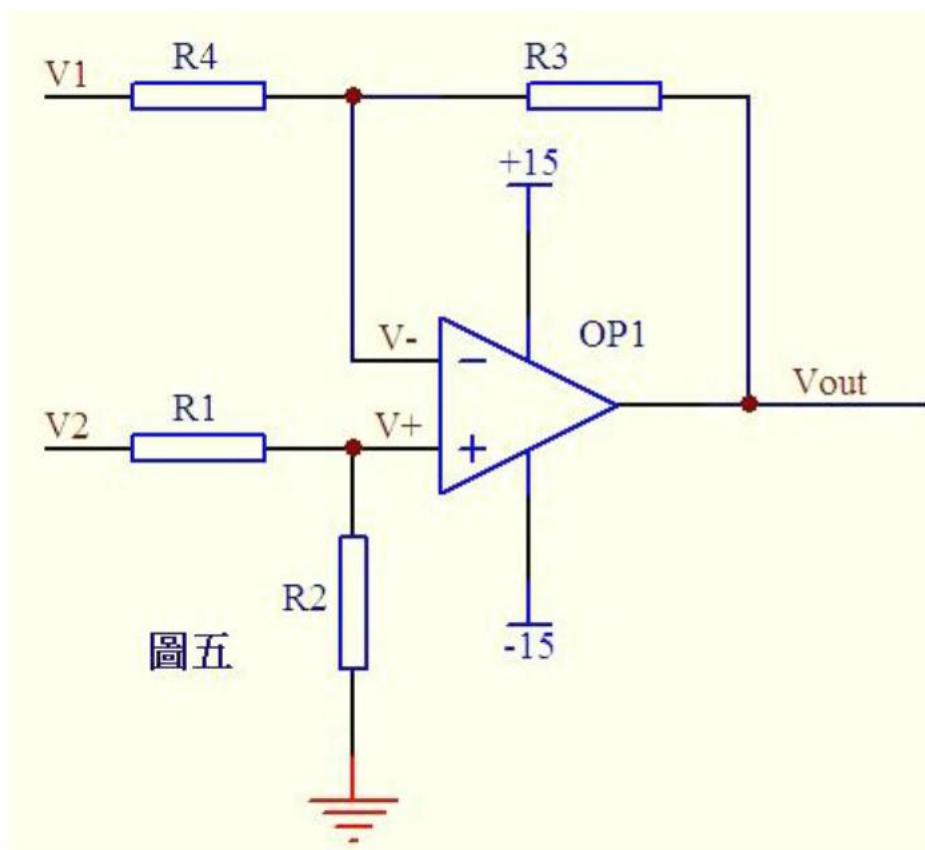
运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。  
 和等于通过 R3 的电流, 故  $(V_1 - V_-)/R_1 + (V_2 - V_-)/R_2 = (V_{out} - V_-)/R_3$  .....b 代入 a 式, b 式变为  $V_1/R_1 + V_2/R_2 = V_{out}/R_3$  如果取  $R_1=R_2=R_3$ , 则上式变为  $V_{out}=V_1+V_2$ , 这就是传说中的加法器了。

(编辑者注) 质疑:  $(V_1 - V_-)/R_1 + (V_2 - V_-)/R_2 = (V_- - V_{out})/R_3$  .....b 图三公式中少了个负号?

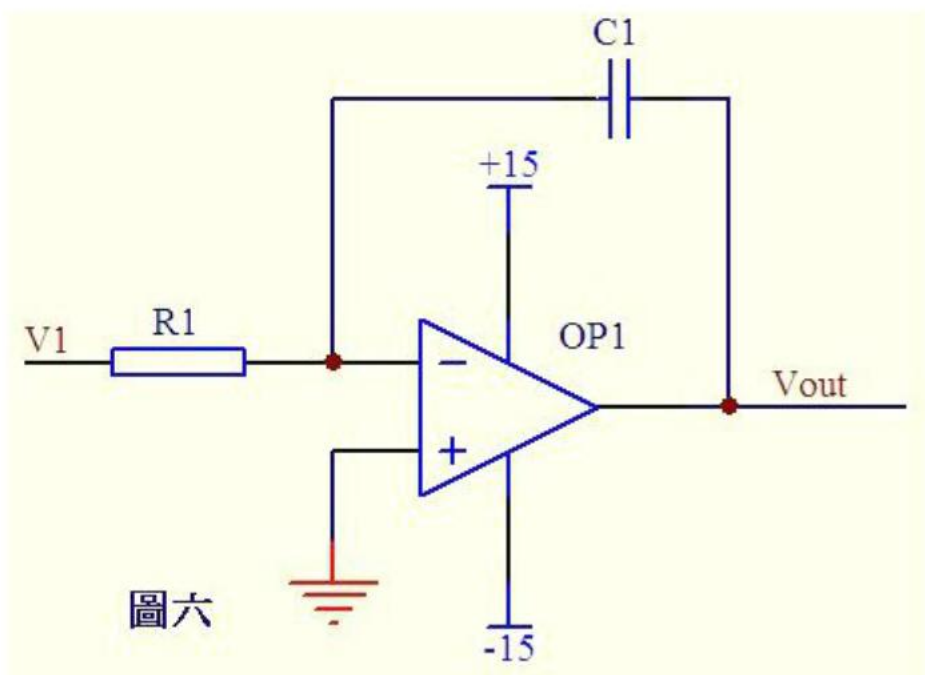


请看图四。因为虚断, 运放同向端没有电流流过, 则流过 R1 和 R2 的电流相等, 同理流过 R4 和 R3 的电流也相等。故  $(V_1 - V_+)/R_1 = (V_+ - V_2)/R_2$  .....a  $(V_{out} - V_-)/R_3 = V_-/R_4$  .....b 由虚短知:  $V_+ = V_-$  .....c 如果  $R_1=R_2, R_3=R_4$ , 则由以上式子可以推导出  $V_+ = (V_1 + V_2)/2$   $V_- = V_{out}/2$  故  $V_{out} = V_1 + V_2$  也是一个加法器, 呵呵!

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



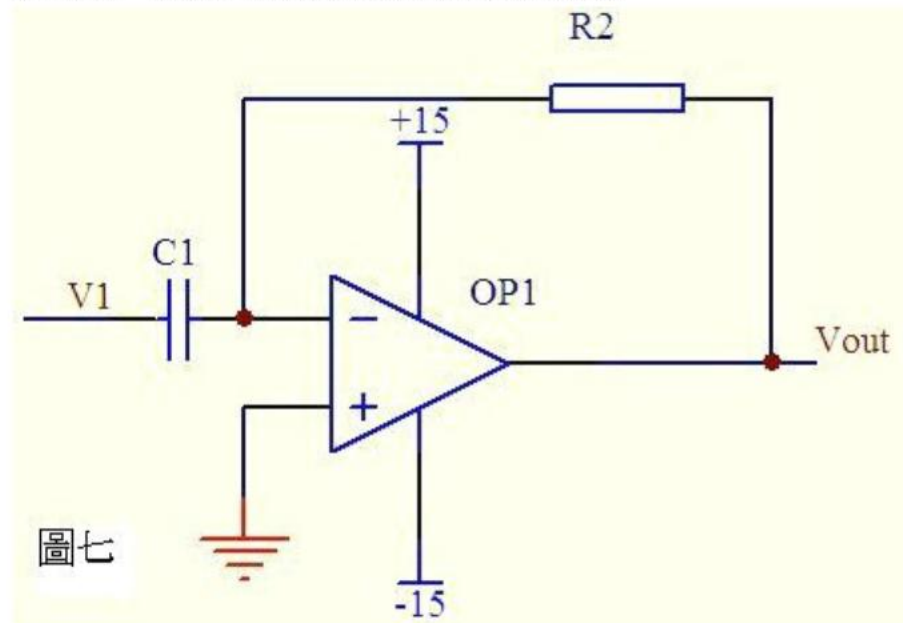
图五由虚断知, 通过 R1 的电流等于通过 R2 的电流, 同理通过 R4 的电流等于 R3 的电流, 故有  $(V2 - V+)/R1 = V+/R2$  .....a  $(V1 - V-)/R4 = (V- - Vout)/R3$  .....b 如果  $R1=R2$ , 则  $V+ = V2/2$  .....c 如果  $R3=R4$ , 则  $V- = (Vout + V1)/2$  .....d 由虚短知  $V+ = V-$  .....e 所以  $Vout=V2-V1$  这就是传说中的减法器了。



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

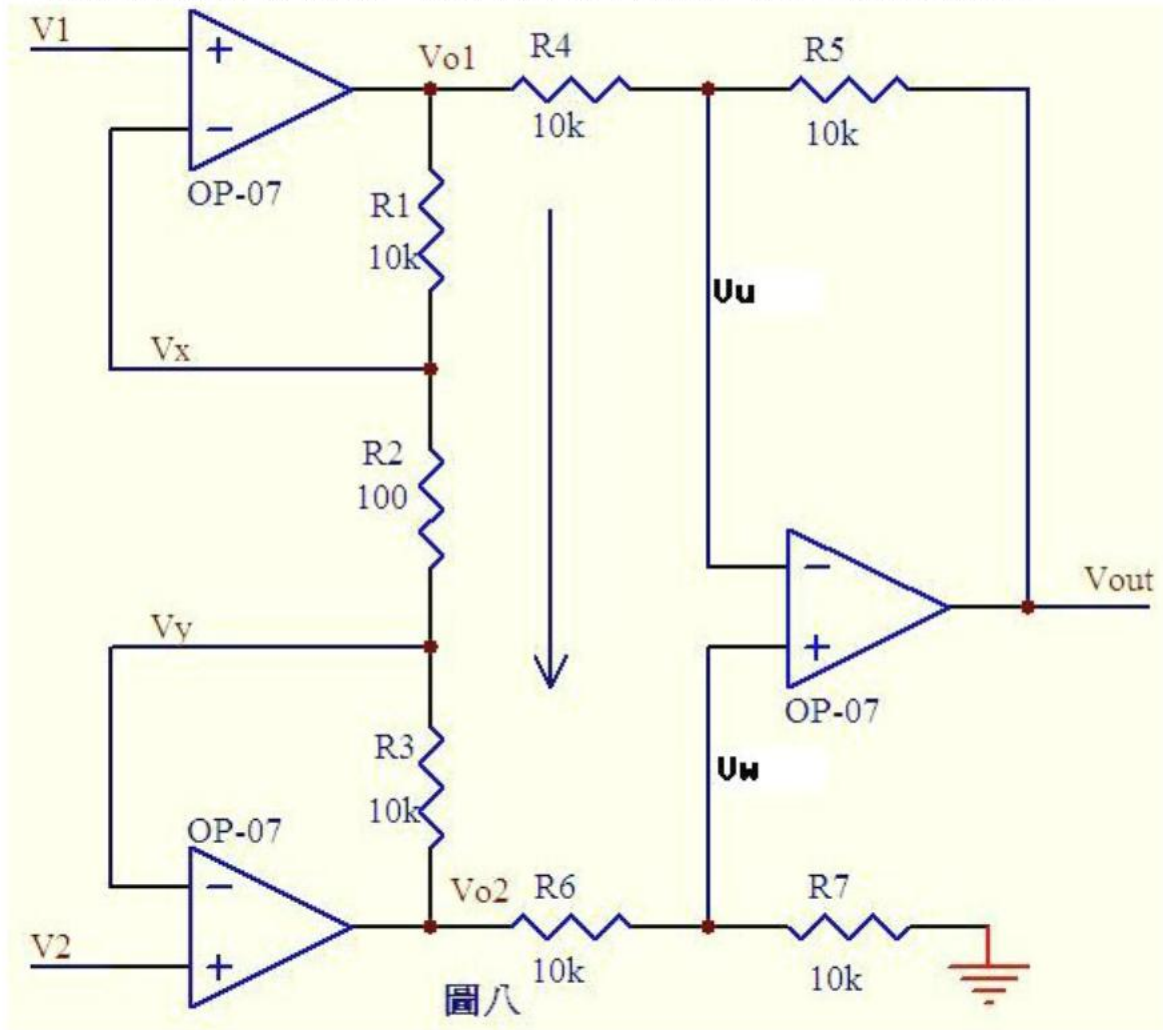


运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。  
 过 C1 的电流相等。通过 R1 的电流  $i = V1/R1$  通过 C1 的电流  $i = C * dUc/dt = -C * dVout/dt$  所以  $Vout = ((-1/(R1 * C1)) \int V1 dt$  输出电压与输入电压对时间的积分成正比, 这就是传说中的积分电路了。若 V1 为恒定电压 U, 则上式变换为  $Vout = -U * t / (R1 * C1)$  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。



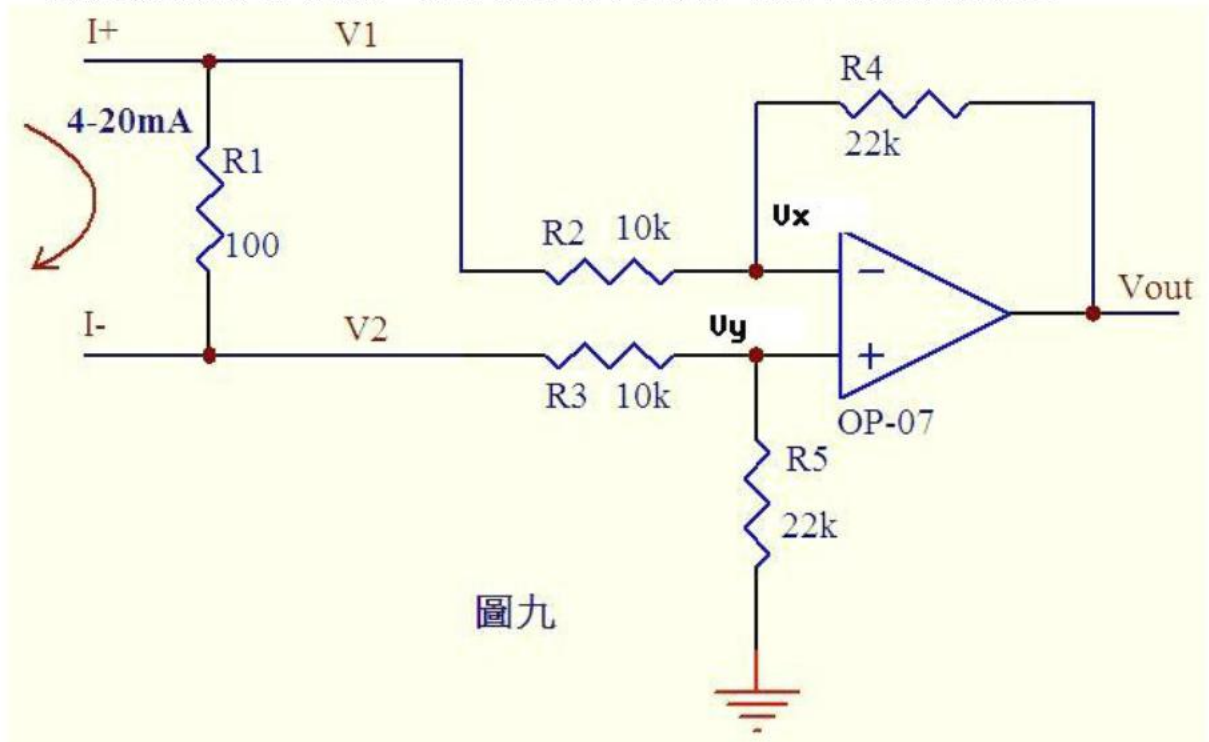
图七中由虚断知, 通过电容 C1 和电阻 R2 的电流是相等的, 由虚短知, 运放同向端与反向端电压是相等的。则:  $Vout = -i * R2 = -(R2 * C1) dV1/dt$  这是一个微分电路。如果 V1 是一个突然加入的直流电压, 则输出 Vout 对应一个方向与 V1 相反的脉冲。

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



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。

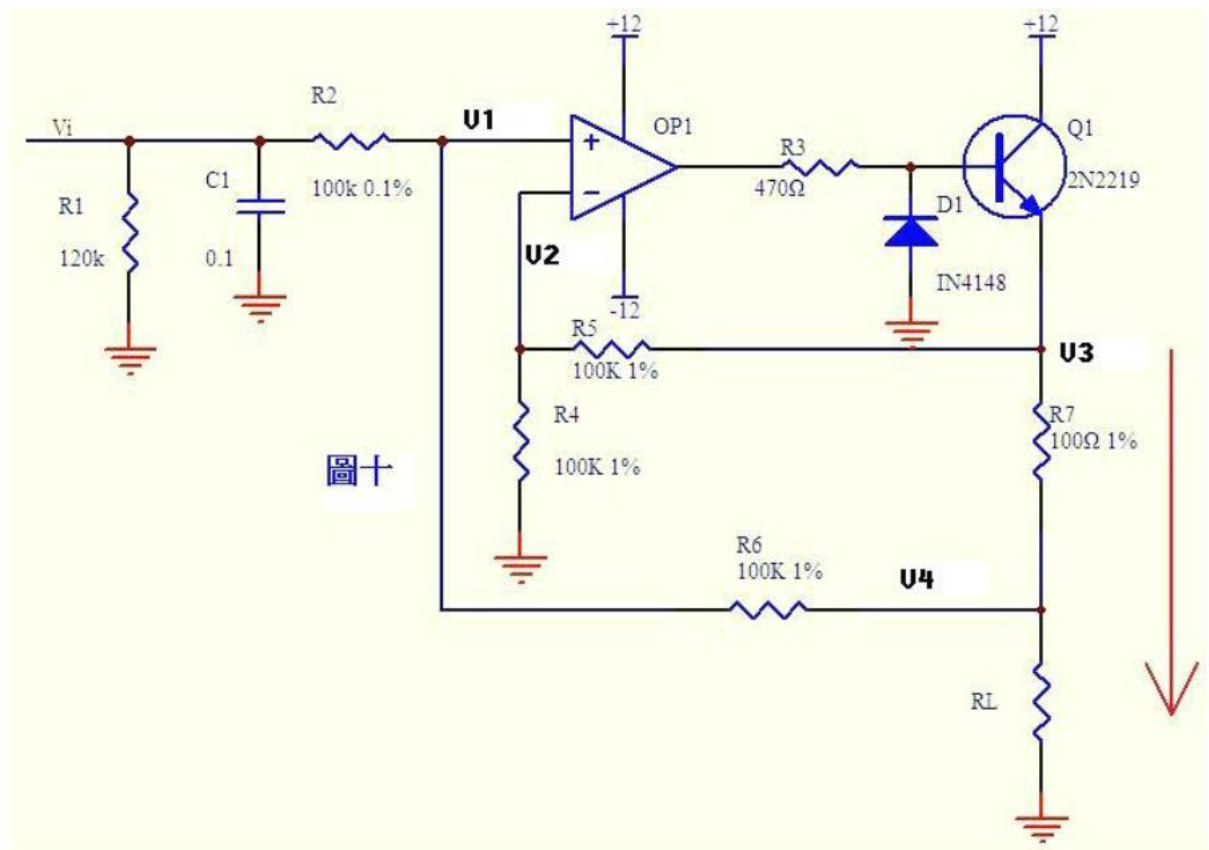
运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



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0~20mA 或4~20mA 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4~20mA 电流流过采样100Ω 电阻 R1, 在 R1 上会产生0.4~2V 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:  $(V_2 - V_y)/R_3 = V_y/R_5$  .....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0~20mA 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  $R_4/R_2 = 22k/10k = 2.2$ , 则 f 式  $V_{out} = -(0.88 \sim 4.4)V$ , 即是说, 将4~20mA 电流转换成了-0.88 ~ -4.4V 电压, 此电压可以送 ADC 去处理。



运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



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,

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

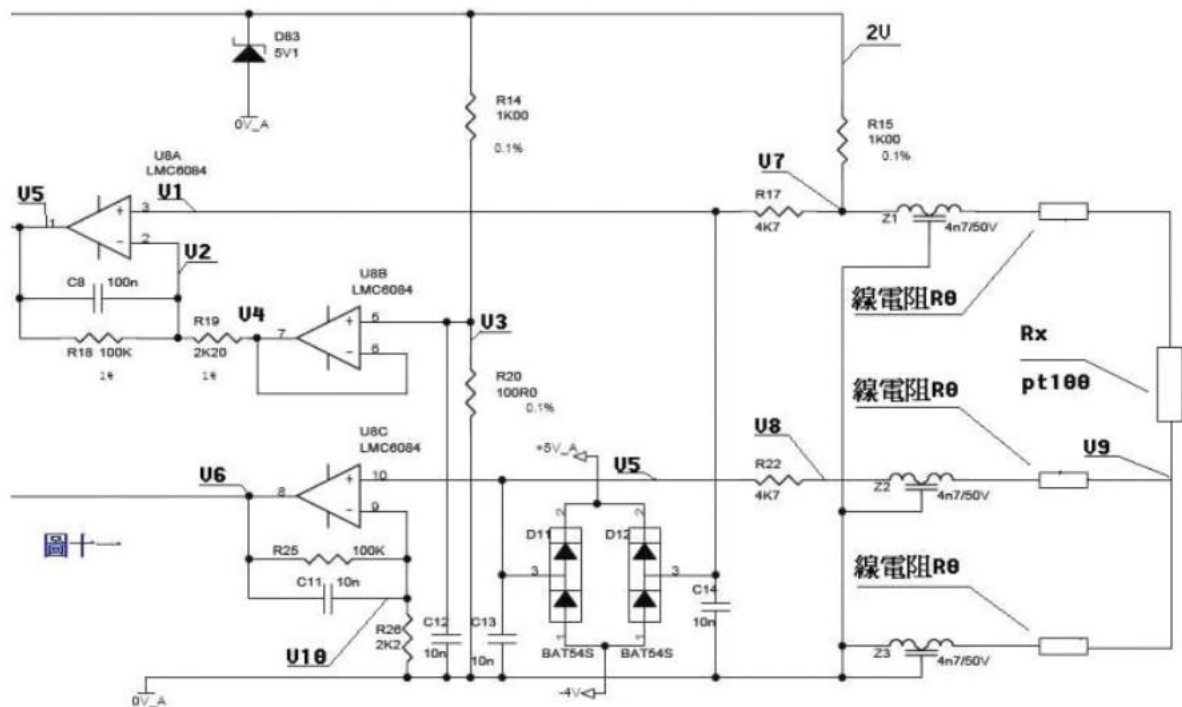
$$\text{同理 } (V_3 - V_2)/R_5 = V_2/R_4 \quad \cdots \cdots b$$

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

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。

运算放大器基本电路 11 个经典电路 作者: jackwang【EERW】 整理: 野鬼 (djslc)  
 本文为 EEPW 论坛 Jacwang 所作, 本人只是为了方便网友阅读稍作整理, 转载或者用作其  
 他用途请先跟原文作者联系, 本人不同意任何非法转载、引用、出版或作其他用途。



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,  $V_3 = 2 \times R_{20} / (R_{14} + 20) = 200 / 1100 = 2 / 11 \dots\dots a$  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,  $V_1 = V_7 \dots\dots d$  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,  $V_7 = 2 \times (R_x + 2R_0) / (R_{15} + R_x + 2R_0) \dots\dots e$  由虚短知, U8A 第 3 脚和第 2 脚电压相等,  $V_1 = V_2 \dots\dots f$  由 abcdef 得,  $(V_5 - V_7) / 100 = (V_7 - V_3) / 2.2$  化简得  $V_5 = (102.2 \times V_7 - 100V_3) / 2.2$  即  $V_5 = 204.4 (R_x + 2R_0) / (1000 + R_x + 2R_0) - 200 / 11 \dots\dots g$  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,  $V_5 = V_8 = V_9 = 2 \times R_0 / (R_{15} + R_x + 2R_0) \dots\dots a$   $(V_6 - V_{10}) / R_{25} = V_{10} / R_{26} \dots\dots b$  由虚短知,  $V_{10} = V_5 \dots\dots c$  由式 abc 得  $V_6 = (102.2 / 2.2) V_5 = 204.4 R_0 / [2.2 (1000 + R_x + 2R_0)] \dots\dots h$  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  $R_0$ , 知道  $R_x$ , 查 pt100 分度表就知道温度的大小了。