

基础三：运算放大器

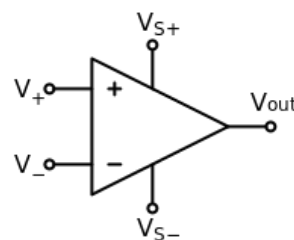
PART THREE: Operational Amplifier

目标 Sections

- S1. 了解运算放大器，一种无编程电子电路；和
- S2. 了解四种基本反馈电路：电压跟随器，反相闭环放大器，反相闭环微分器和求和放大器。

S1. 原理

运算放大器的电路符号如右图所示，一般由五个端口组成。以下关于运算放大器的介绍摘自维基百科 (<https://zh.wikipedia.org/wiki/运算放大器>)：

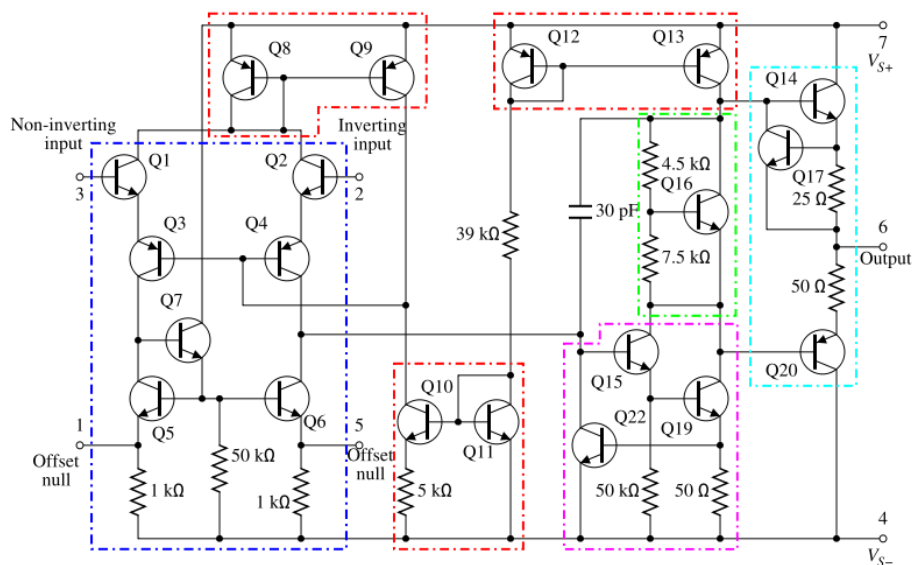


“**运算放大器**（英语：Operational Amplifier，简称 OP、OPA、op-amp、运放）是一种直流耦合，差模（差动模式）输入、通常为单端输出（Differential-in, single-ended output）的高增益（gain）电压放大器。在这种配置下，运算放大器能产生一个比输入端电势差大数十万倍的输出电势（对地而言）。因为刚开始主要用于加法，减法等模拟运算电路中，因而得名。通常使用运算放大器时，会将其输出端与其反相输入端（inverting input node）连接，形成一负反馈组态。原因是运算放大器的电压增益非常大，范围从数百至数万倍不等，使用负反馈方可保证电路的稳定运作。”

理想的运算放大器，可以近似为一个“超级三极管”，把电压差放大无限倍（ $k \rightarrow \infty$ ），

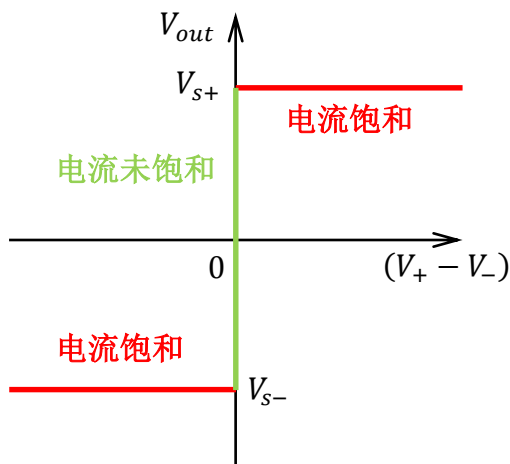
$$V_{out} = k(V_+ - V_-)$$

对目前的工业技术而言，我们尚且还无法实现“无穷大”的放大倍数。通过一系列电子元件（包括 22 只三极管，11 只电阻，和一只电容器）的有序组合、集成，我们得到了一只功能稳定的 741 运算放大器。尽管如此，它的放大倍数也可以高达 $k = 10^5$ 。下图展示了 741 运算放大器的内部电路：镜像电流源(红虚线框)；差分放大器(蓝)；A 类增益级(品红)；电压电平转换器(绿)；输出级(青)。

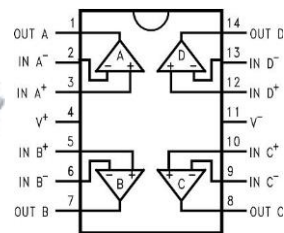


这种运算放大器主要依赖三极管的放大作用，所以流经五个端口的电流都有可能达到三极管的**饱和电流**，并且 V_{out} “以 V_{S-} 为最小值”和“以 V_{S+} 为最大值”。那么，会出现以下两种情况，见下图：

- 如果电流未饱和， V_{out} 输出一个电压，并且 $V_+ = V_-$ （实际存在小到可以忽略的电压差）。显然，这应该是运放的通常工作状态，需要**反馈电路**才能实现；
- 如果电流饱和， V_{out} 输出饱和电压（ V_{S-} 或 V_{S+} ），并且 $V_+ \neq V_-$ 。饱和是非常不好的状态，这样子的运放已经基本失效了。



在后面的磁悬浮设计中，我们会使用 LM324 运算放大器。它其实是四个放大器的合体，**零售**单价只需要 0.27 元人民币（2016 年 1 月 7 日）！



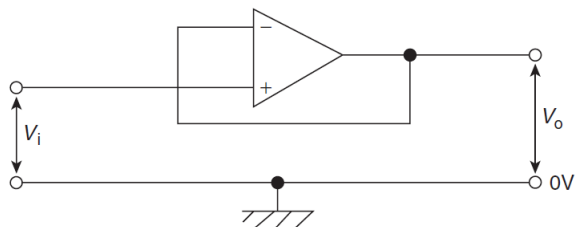
S2. 反馈电路

那么高大上的运算放大器，不需要窜天猴就能上天哩~我们这里介绍四种后续会涉及到的（负）反馈电路。

【应用一】电压跟随器

根据右图可得，

$$V_o = k(V_i - V_o) \text{ 或 } V_o = \frac{k}{k+1} V_i = \frac{100000}{100001} V_i \approx V_i$$



啊，什么？ $V_o \approx V_i$ ，这是不是有点“脱裤子放屁——多此一举”的感觉？

当然不会啦，这个电压跟随器有特别的作用。首先，由于运算放大器的输入电流往往很小（微安级别），这样小的电流，几乎不会影响 V_i ；同时，运算放大器是有源元件（ V_{s-} 和 V_{s+} ）， V_o 既可以维持在 V_i 的水平，也可以输出一定大小的电流（毫安级别）。所以，这个电压跟随器常常被用于信号测量电路，如红外线距离感受器的输出，能最大限度地保护信号电压。

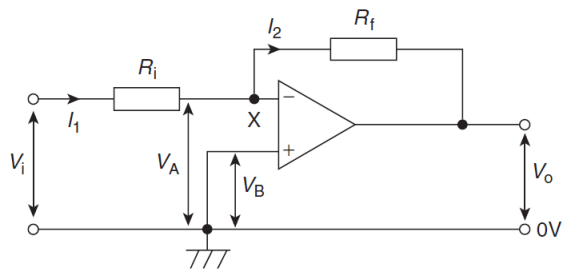
【应用二】反相闭环放大器

首先，在电流未饱和的条件下，我们可以得到，

$$X = V_B = 0$$

接着，应用电流定律，

$$I_1 = \frac{V_i - X}{R_i} = I_2 = \frac{X - V_o}{R_f}$$



综合以上两条方程可得，

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

这样，如果 $V_i > 0$ ，那么 $V_o < 0$ ；反之亦然。而且， V_i 与 V_o 之间存在一个放大或缩小关系 R_f/R_i 。感觉，怎么有点“小孔成像”的味道~

【应用三】反相闭环微分器

不知道，你发现了没有：右图的电路只不过用**电容器**， C ，取代了【应用二】中的 R_i 。

根据电容器的**充放电**性质，

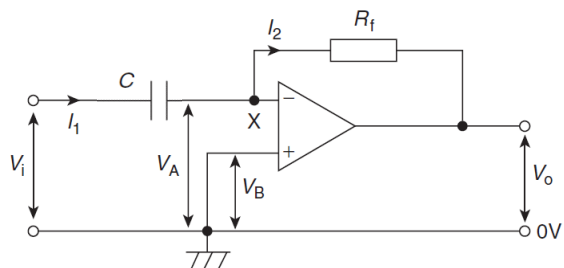
$$I_1 = C \frac{\partial(V_i - X)}{\partial t} = I_2 = \frac{X - V_o}{R_f}$$

可得 ($X = 0$)，

$$V_o = -R_f C \frac{\partial V_i}{\partial t}$$

也就是说， V_o 与 V_i 的**时间变化率**成正比。如果， V_i 是恒定电压，那么 $V_o = 0$ 。

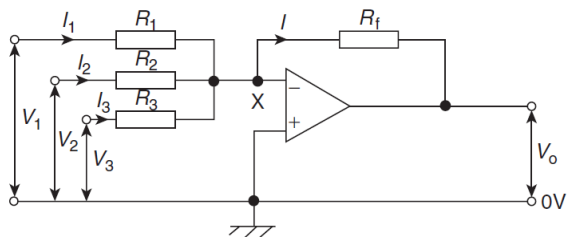
另外，在实际操作中，我们也需要在 R_f 的两端并联一只小电容器（大约 103，也就是 10nF 即可），用于去除高频振荡信号。



【应用四】求和放大器

这个应用其实是【应用二】的拓展，我们易得下面的数学求和关系，

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$



拉诺还设计了一个小实验，让大家感受一下，这个纯电子电路“做数学题”的本领有多强大！