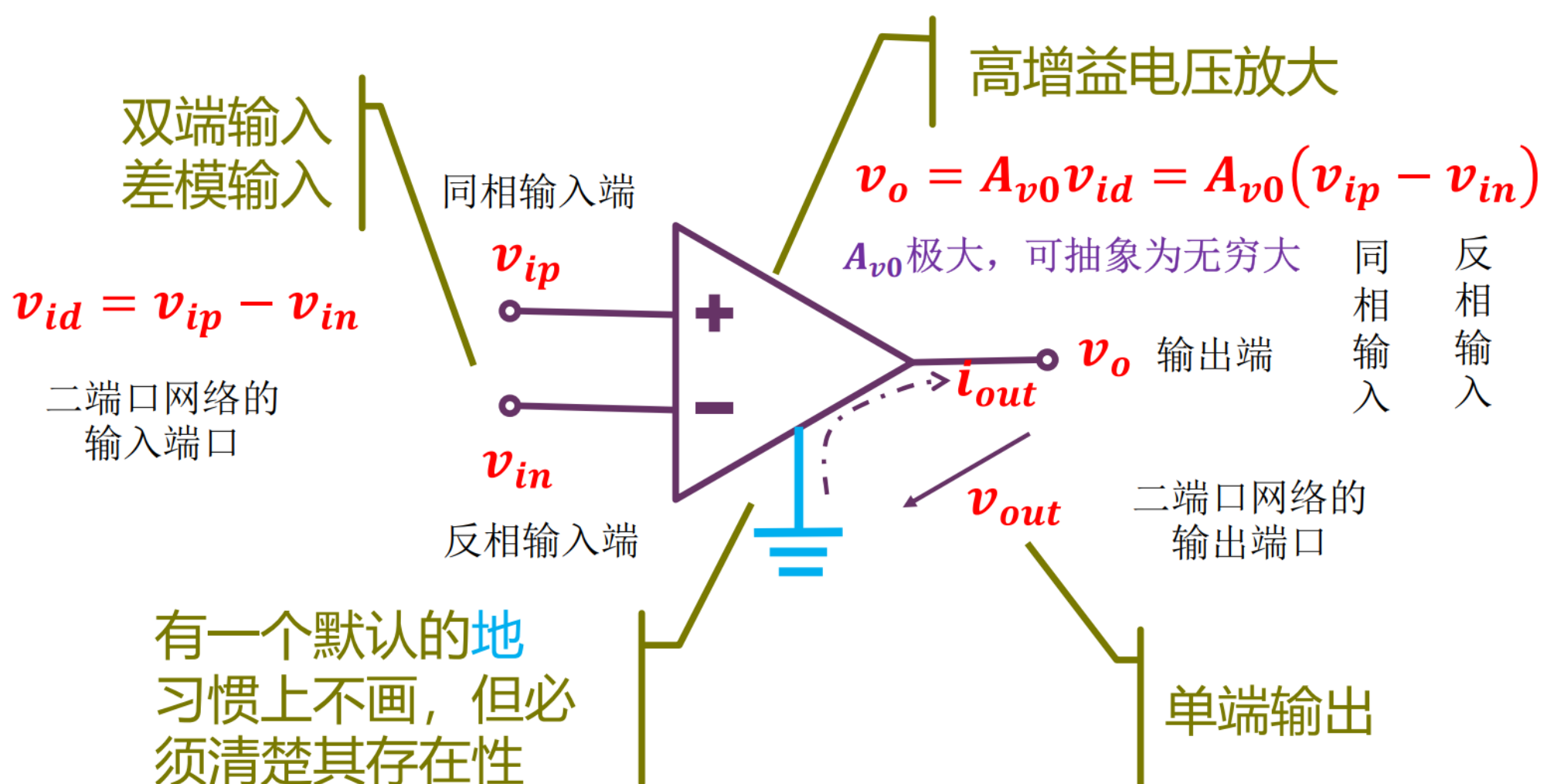


1.6 运放和二极管

Core Concepts:

- 运算放大器
 - 电路模型
 - 正/负饱和区
 - 线性区
 - 理想运放（虚短和虚断）
 - 负反馈连接：保证工作在线性区
 - 使用运放实现常见功能（也涉及到二极管的使用）
 - [反相和同相](#)电压放大电路
 - 加法电路
 - Voltage Follower
 - 差分放大电路
 - 差模信号和共模信号
 - CMRR
- 二极管
 - 端口伏安特性
 - 正偏导通
 - 反偏截止
 - 反向击穿
 - 典型应用
 - 整流
 - 稳压
 - 信号运算
 - 限幅
 - 产生半波信号

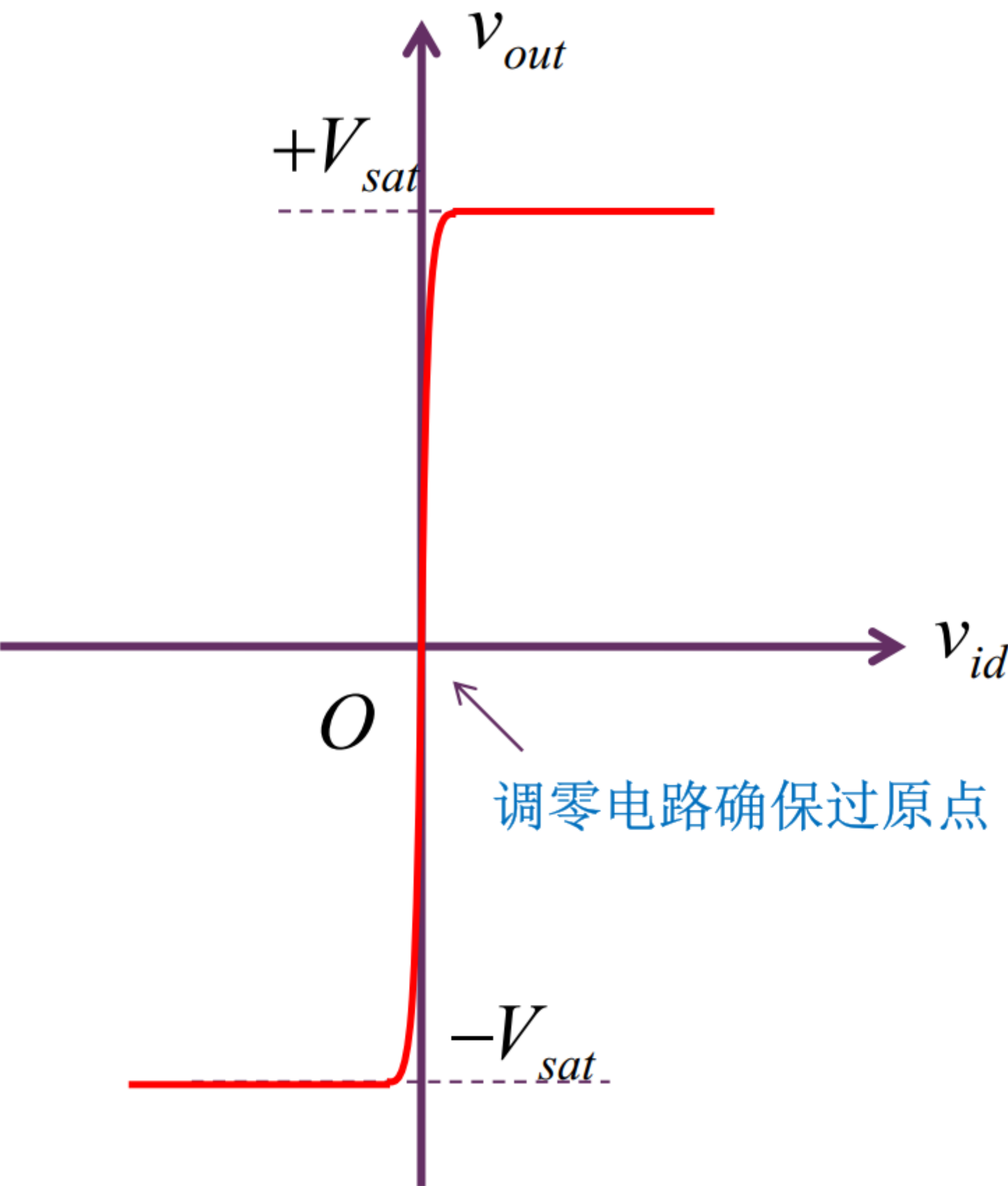
运算放大器：



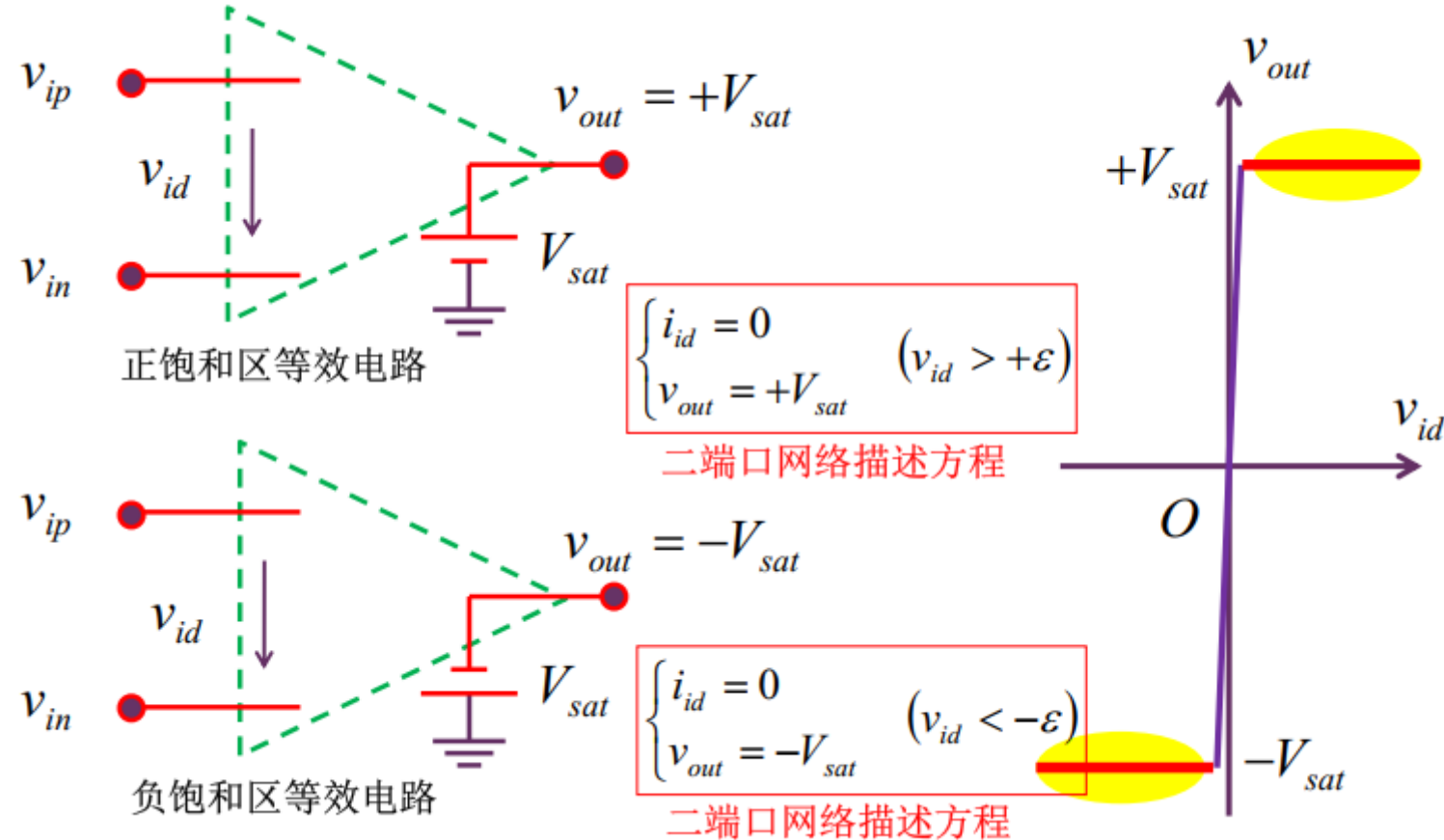
PS：默认接地，所以一般不画出接地极

电路模型

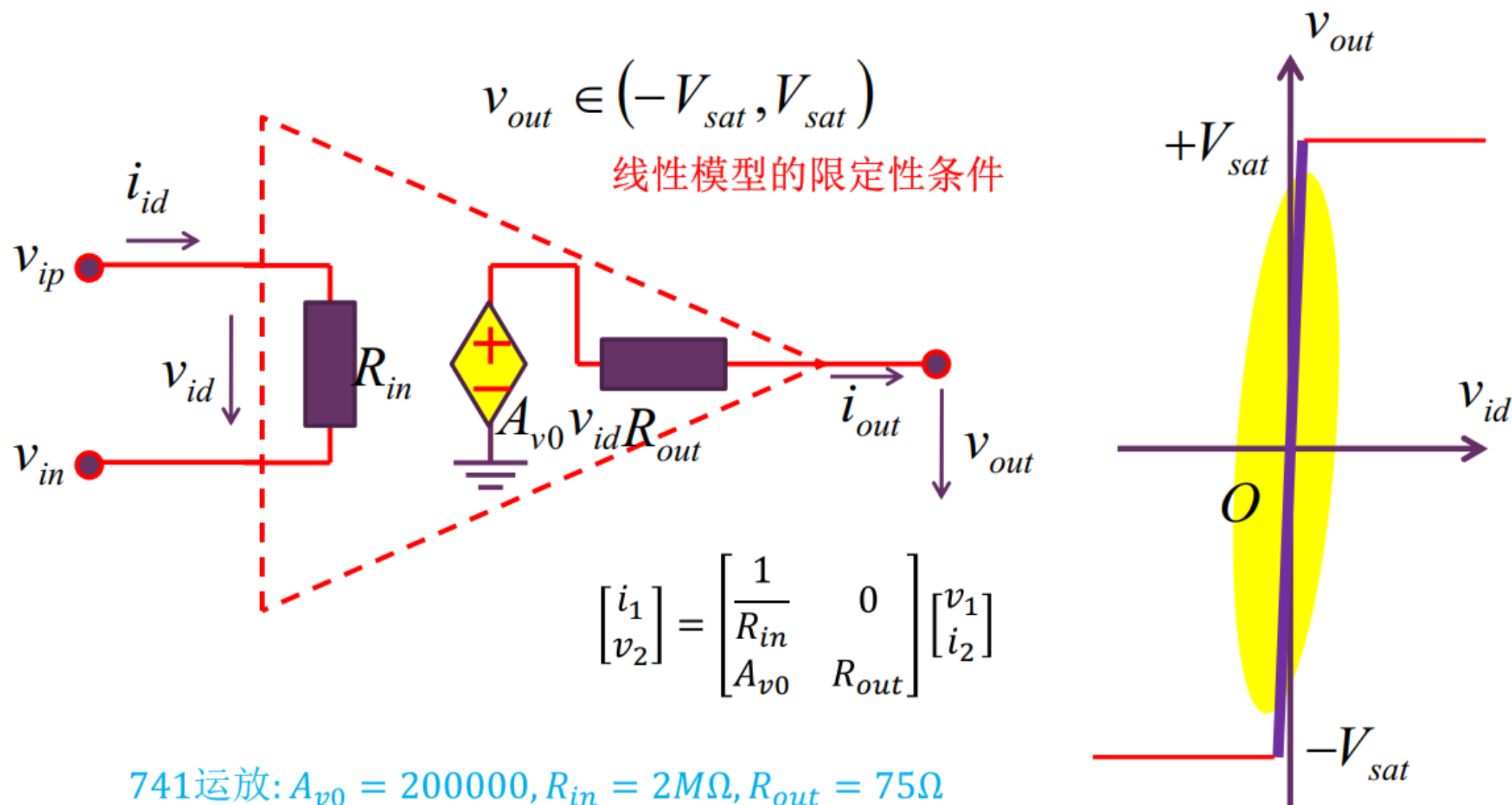
电压转移特性曲线：



- 正/负饱和区的电路模型：
端口1开路，端口2恒压源（正饱和电压或负饱和电压）



- 线性区的电路模型：
端口1纯电阻，端口2有一个压控压源（这是一个单向非互易网络）



PS: 注意线性区的条件: 输出 v_{out} 需要在 $\pm V_{sat}$ 之间

理想运放（虚短和虚断）

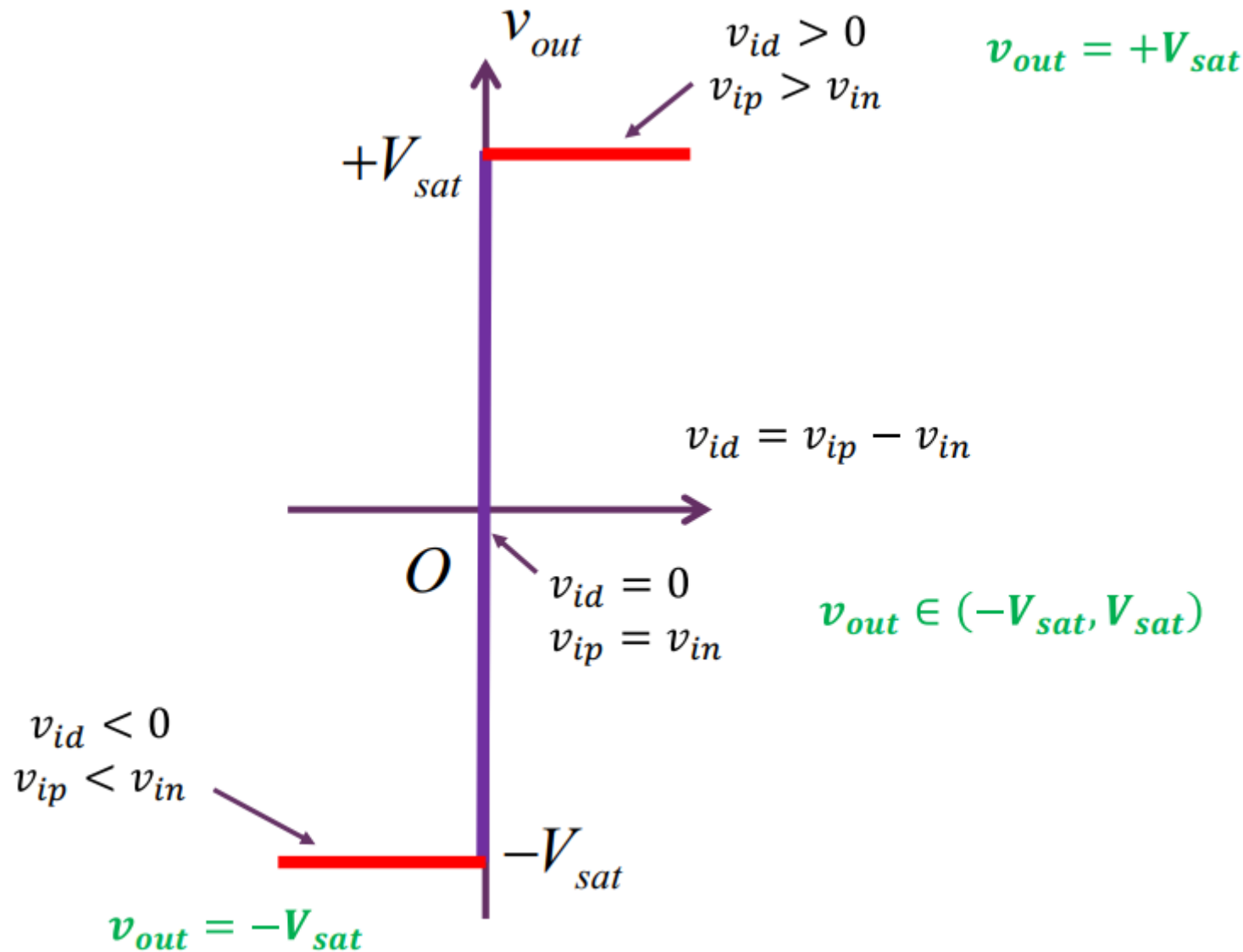
理想运放是人们对实际运放很大的电压增益的抽象：电压增益被抽象为无穷大（ A_{v0} ）：
 ABCD参量在此抽象下约为0，抽象得到虚短和虚断的理想运放特性

$$\begin{bmatrix} v_{id} \\ i_{id} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_{v0}} & \frac{1}{G_{m0}} \\ \frac{1}{R_{m0}} & \frac{1}{A_{i0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{out} \\ i_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_{v0}} & \frac{R_{out}}{A_{v0}} \\ \frac{1}{A_{v0}R_{in}} & \frac{R_{out}}{A_{v0}R_{in}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{out} \\ i_{out} \end{bmatrix} \xrightarrow{A_{v0} \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{out} \\ i_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ABCD参量

理想运放具有无穷大增益

只要运放工作在线性区，就有 $V_{id} = 0$ ，理想运放输入端口电压为0：犹如短路，却非真短，称为虚短； $i_{id} = 0$ ，理想运放输入端口电流为0：犹如开路，其实极小，称为虚断
 PS:是虚短虚断，而不是真短真断，不能想当然的用替代定理（）



如果无法使用虚短虚断（并非工作在线性区），此时就要考虑 $V_{id} = V_{ip} - V_{in}$ 的正负号，如果是正，就输出正饱和电压，如果是负，就输出负饱和电压。

（符号解释： V_{id} 是Input Drive即输入驱动电压，是差分后的电压 $V_{id} = V_{ip} - V_{in}$ ， V_{ip} 是正向输入电压， V_{in} 是负向输入电压）

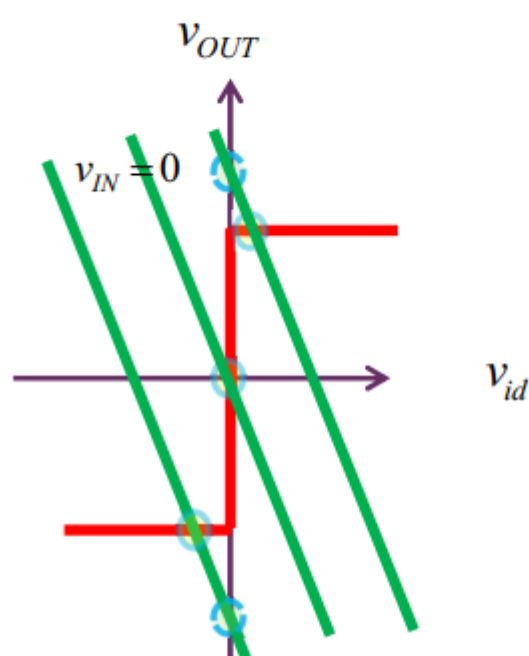
负反馈链接

Def：环路中任一点的初始扰动环路一周后被抑制，就是负反馈 (Negative Feedback)，如果初始扰动被增强则称为正反馈 (Positive Feedback)

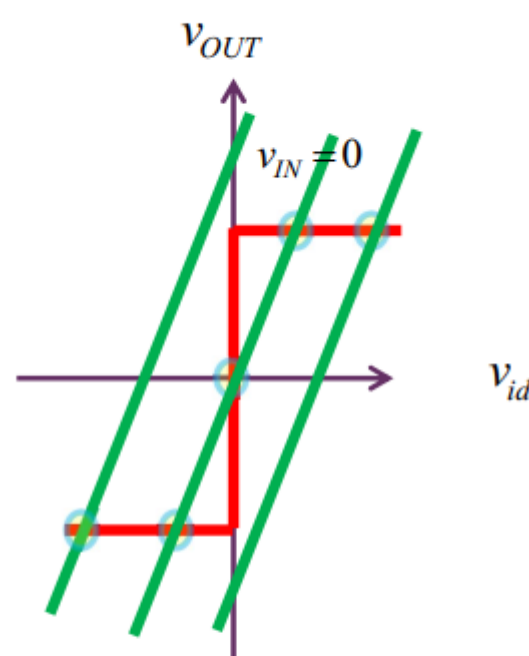
对于运放电路，从输出端通过电阻、电容等无源元件构成的网络引回到反相输入端，统称为负反馈连接。（这是因为不考虑反馈环路中存在高阶电路元件）

负反馈具有唯一解从而可以假定在线性区工作（一般最后也就是在线性区工作）

负反馈具有唯一解从而可以假设线性区工作



负反馈连接，运放外围线性电阻反馈网络导致的 v_{id} - v_{out} 关系为负斜率直线，负反馈具有唯一解。可以简单地假设运放工作在线性区，是否真的工作在线性区，只需对分析结果做限定性条件检查



正反馈连接，运放外围线性电阻反馈网络导致的 v_{id} - v_{out} 关系为正斜率直线，正反馈可能存在多解。不能简单地假设运放工作在线性区，运放到底工作在哪个工作区，需要更细致的动态分析（下学期讨论）

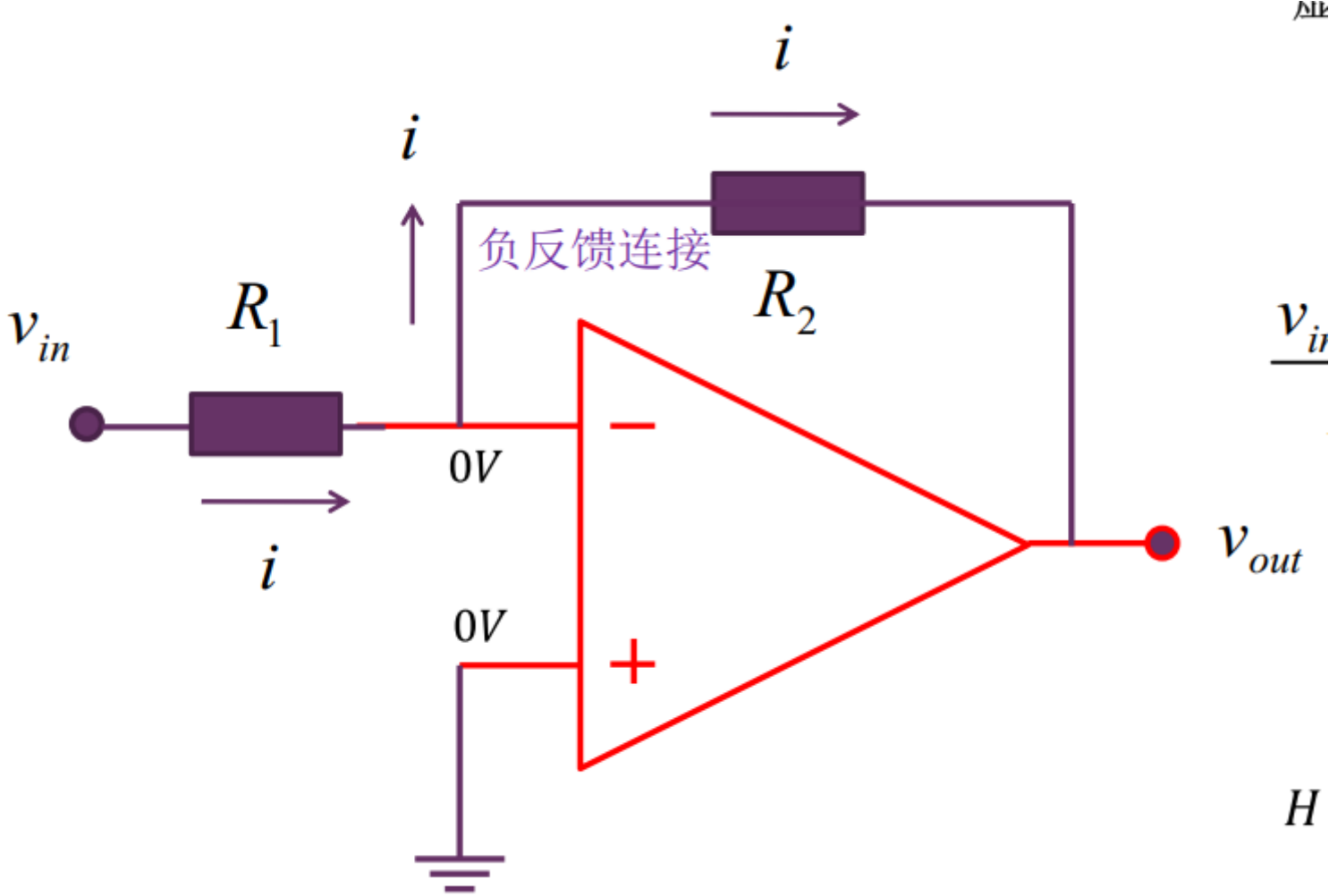
常见功能电路

常用功能：

- 信号放大
- 运算
- 其他（电压跟随器--缓冲器，限幅）

放大：

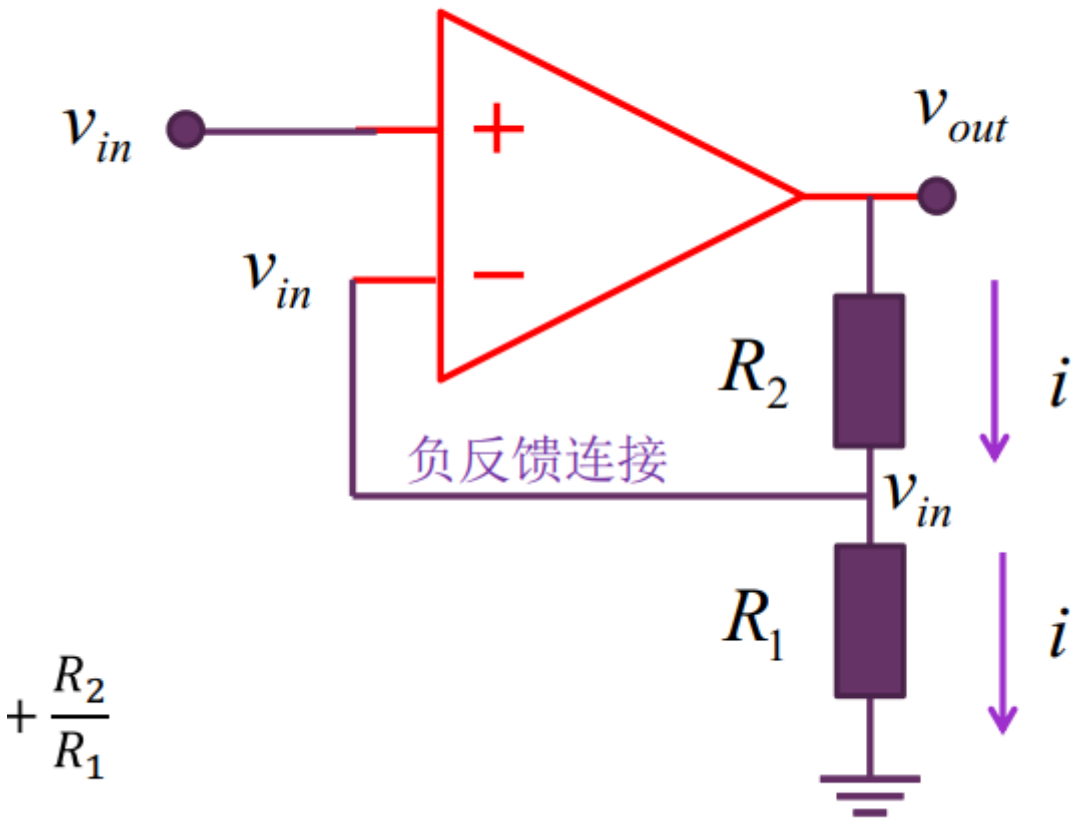
1.反相电压放大：



利用虚短虚断特性分析可得 $V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$ ，即 $H_V = -\frac{R_2}{R_1}$

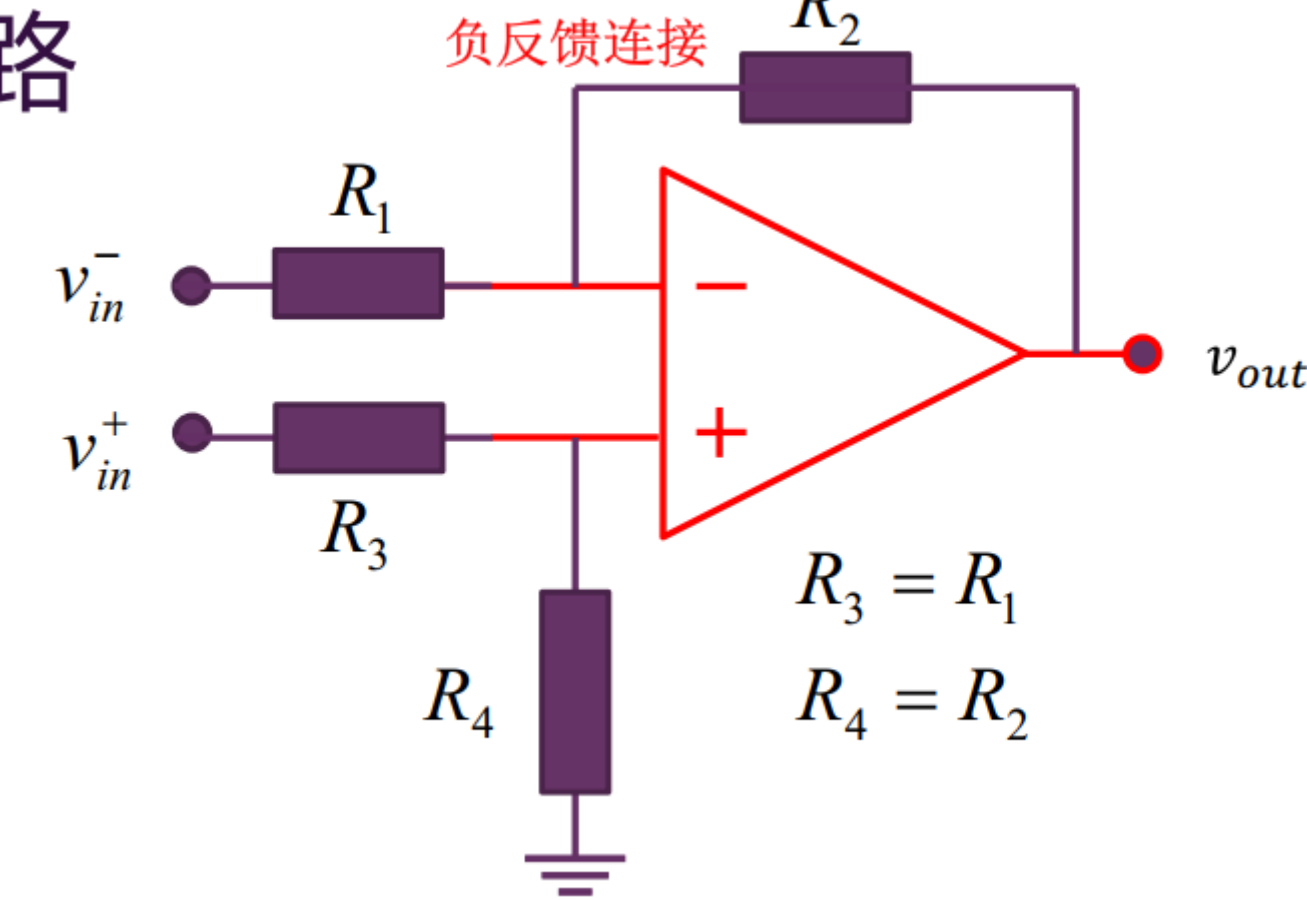
2.同相电压放大：

同相电压放大电路



分析可得 $H_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

3. 差分放大:



根据虚短虚断特性分析可得:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{in}^+ - \frac{R_2}{R_1} v_{in}^-$$

为了实现差分放大的功能, 令 $R_1 = R_3, R_2 = R_4$, 于是得 $V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (v_{in}^+ - v_{in}^-)$

PS: 差分放大电路的差分特性就来自于其结构的对称性

- 差模信号和共模信号:

对于双端信号, 定义如下: 差模信号 $V_{id} = V_{ip} - V_{in}$, 共模信号 $V_{ic} = \frac{V_{ip} + V_{in}}{2}$, 于是双端信号可以分解为差模信号和共模信号叠加:

$$V_{ip} = V_{ic} + 0.5V_{id}, V_{in} = V_{ic} - 0.5V_{id}$$

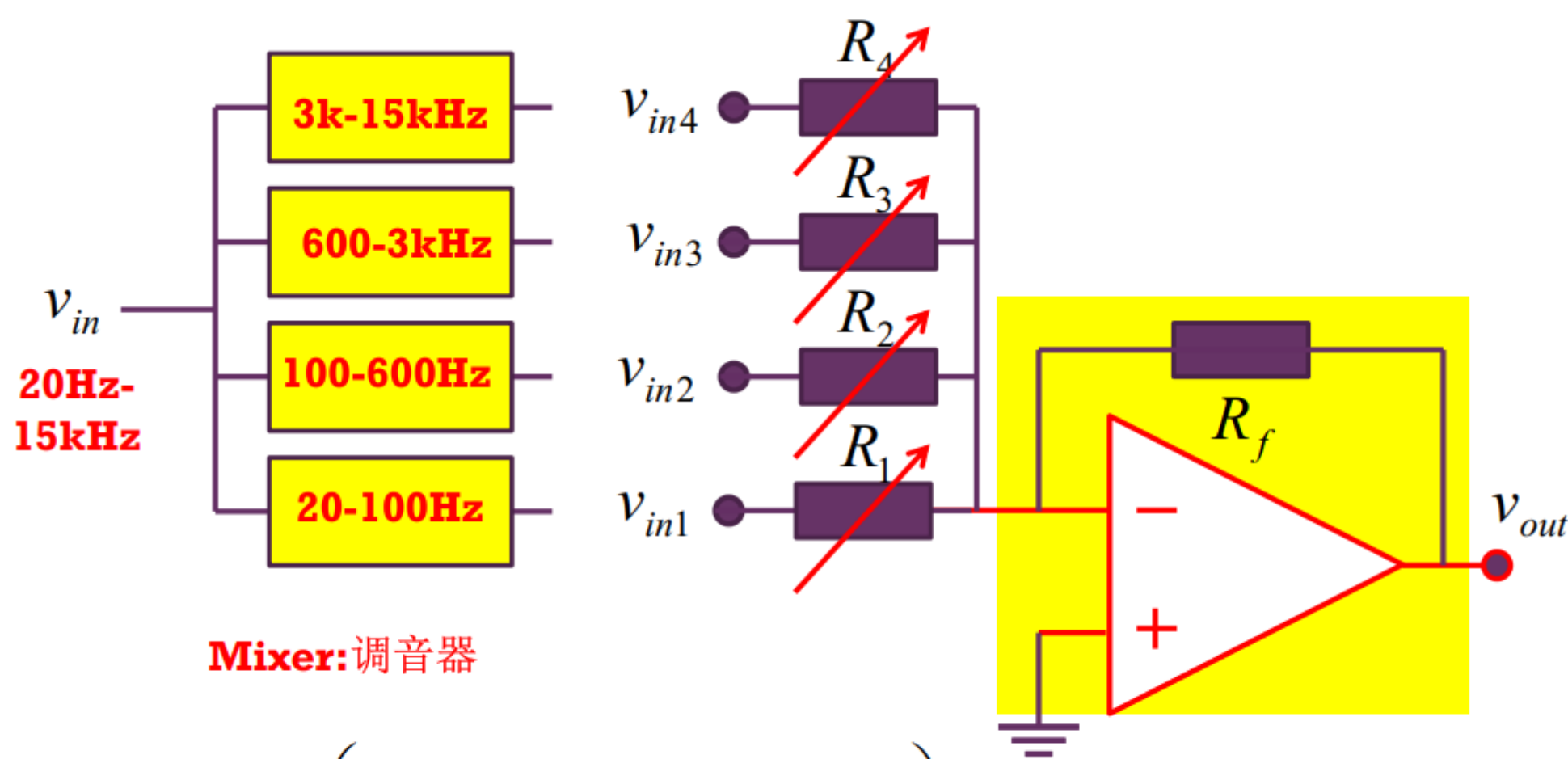
所以可知理想运放只放大差分信号, 不放大共模信号

为了描述实际运放放大效果的理想程度, 定义**共模抑制比(CMRR)**: $v_{out} = A_{vp}v_{ip} + A_{vn}v_{in} = A_{vd}v_{id} + A_{vc}v_{ic}$: $CMRR = \left|\frac{A_{vd}}{A_{vc}}\right|$

PS: 理想差分放大器的共模抑制能力也来源于结构的对称性

运算:

加法电路:



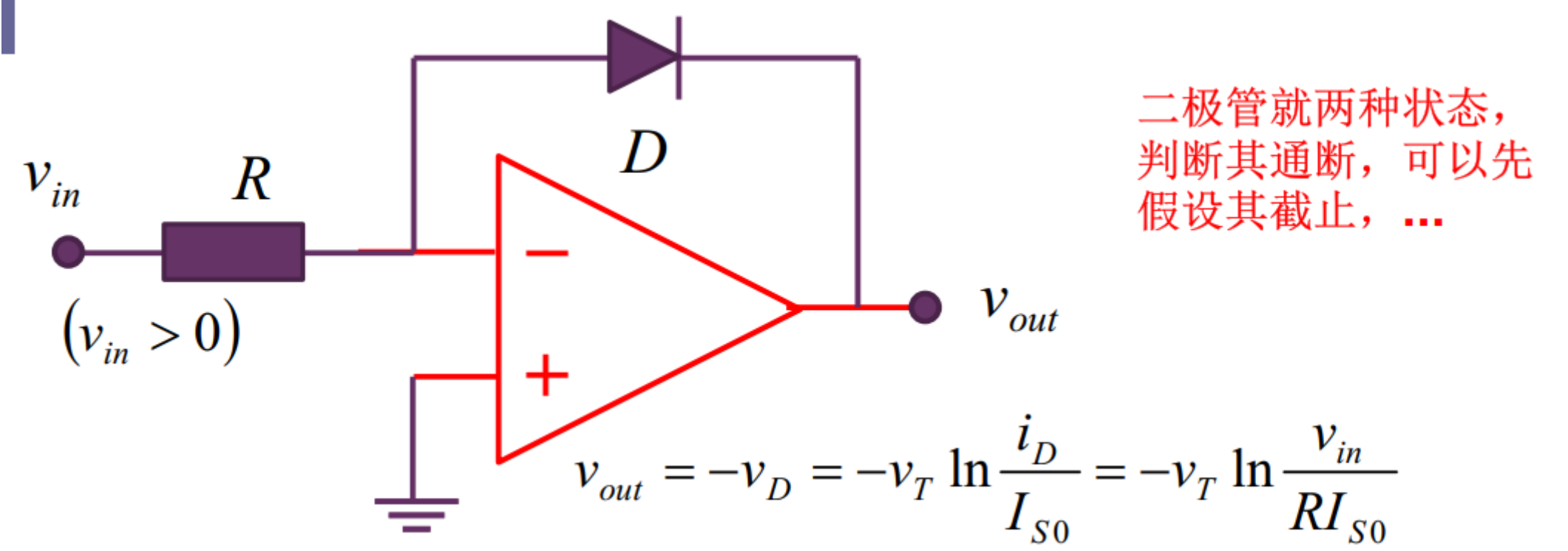
$$v_{out} = -\left(\frac{v_{in1}}{R_1} + \frac{v_{in2}}{R_2} + \frac{v_{in3}}{R_3} + \frac{v_{in4}}{R_4}\right) R_f$$

加法电路

其可以实现二进制的加权求和

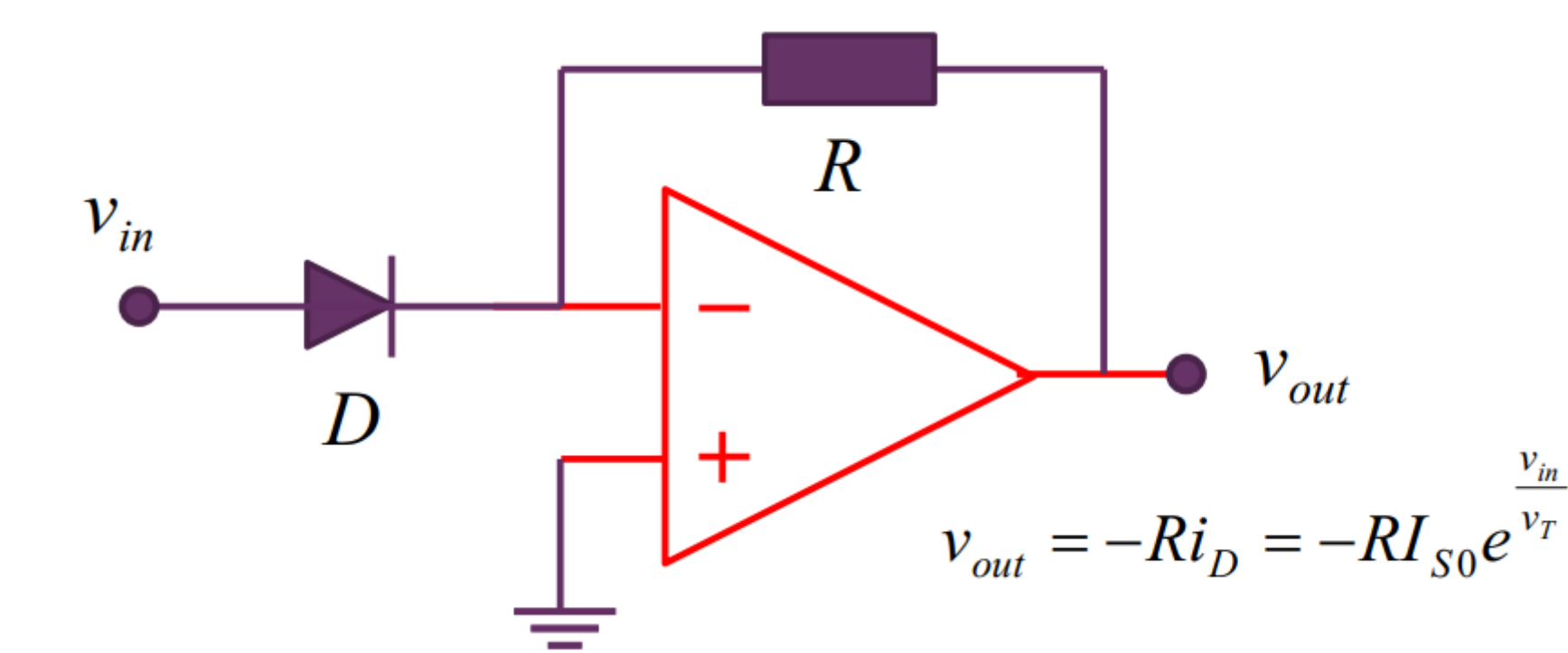
指数、对数运算：

PS：在正向小电流条件下，有 $i_D \approx I_{S0}e^{\frac{v_D}{V_T}}$ ，其中 I_{S0} 在 fA 量级， $V_T \approx 26mV$



实现电压的对数运算：

- 当 $V_{in} > 0$ 时，这里有二极管参与，先假设二极管截止分析，发现反相输入端口输入电压为正，因此输出电压为负饱和电压，所以二极管导通，假设不成立，所以分析二极管两端电压和电流的关系，可以得到 V_{out} 和 V_{in} 的对数关系。
- 当 $V_{in} < 0$ 时，假设二极管截止，输出正饱和电压，二极管的确截止，所以输出正饱和电压。



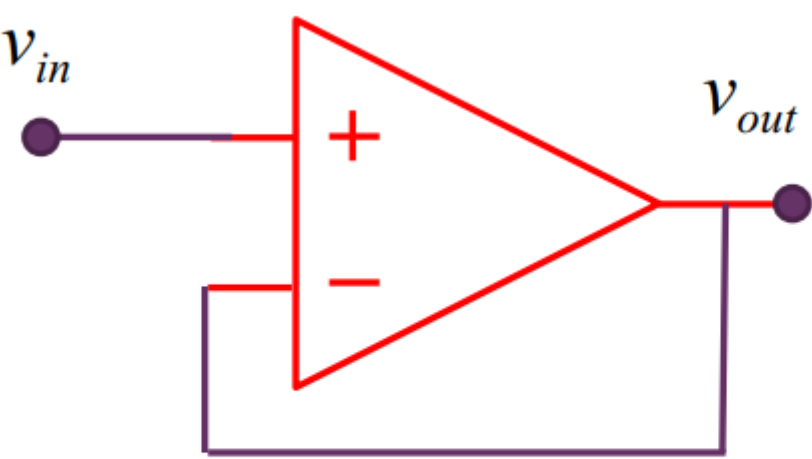
实现电压的指数运算：

- 当 $V_{in} > 0$ 时，这个不需要假设二极管是否导通，因为很明显是导通的。于是根据虚短虚断特性分析出 V_{out} 和 V_{in} 的指数关系
- 当 $V_{in} < 0$ 时，二极管反向截止，输出电压为0。

半波运算（非线性运算）：

其他功能：

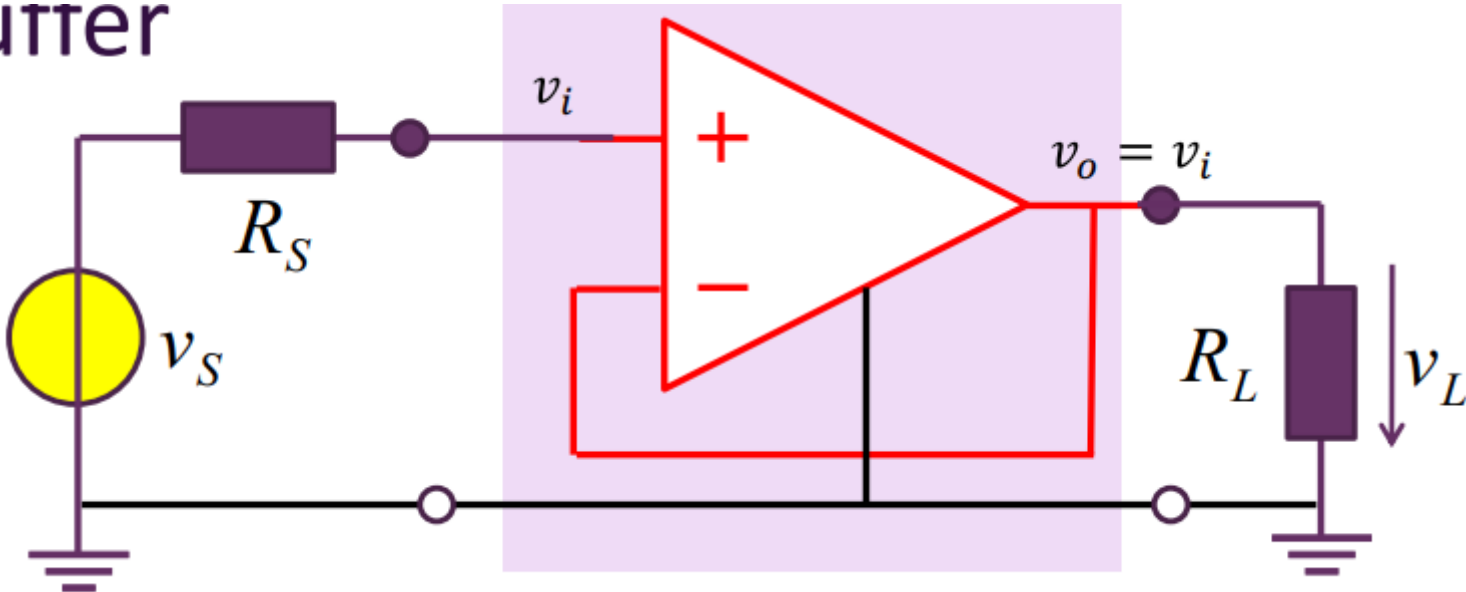
1.Voltage Follower



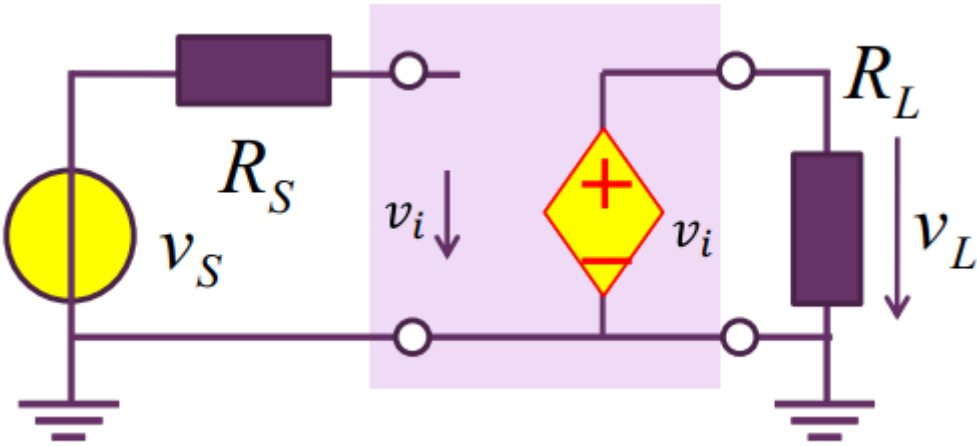
$$v_{out} = v_{in}$$

可以保证 $V_{out} = V_{in}$ 恒成立。
可以组成缓冲器Buffer:

Buffer

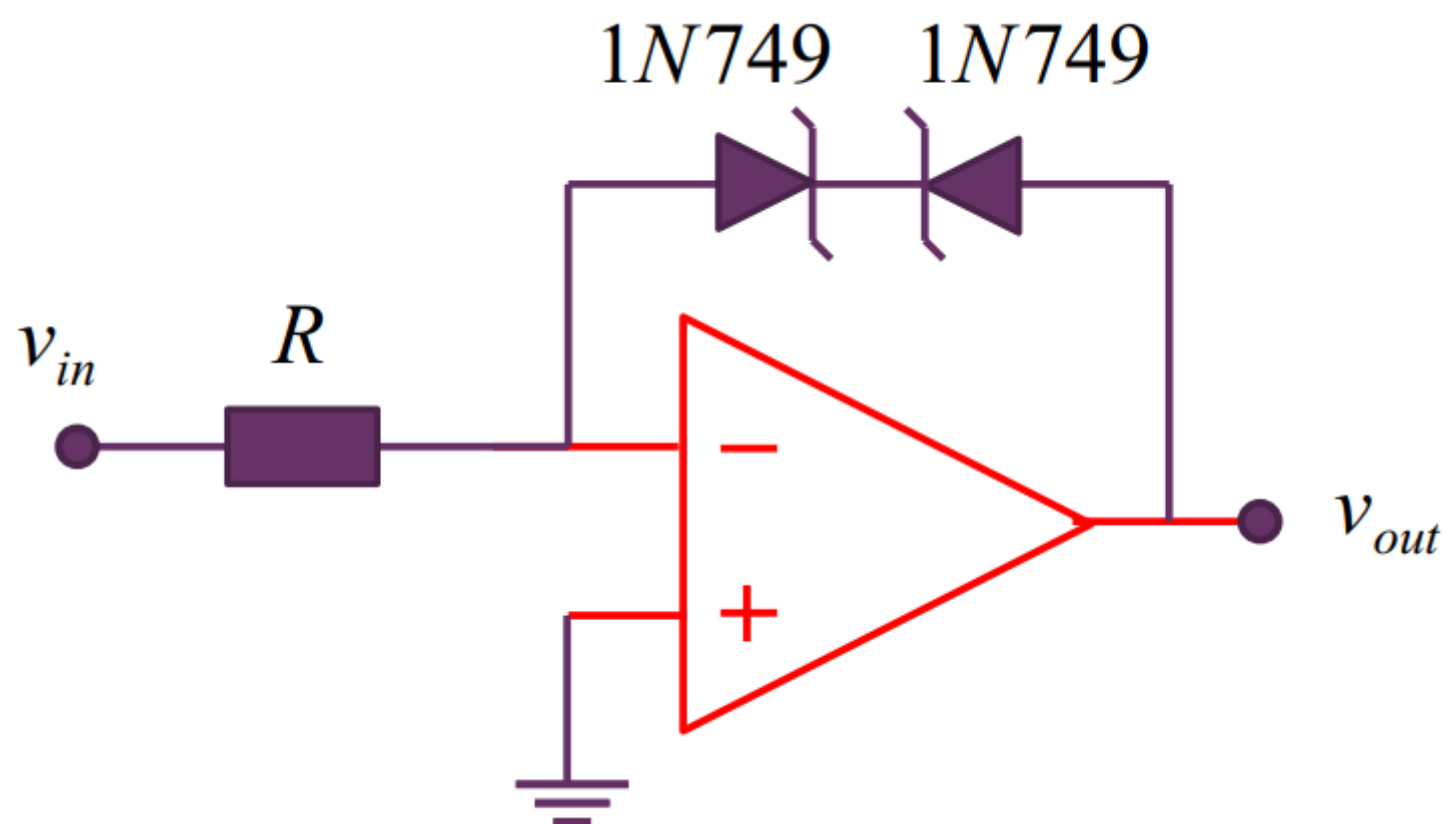


因为虚断，所以 $V_{in} = V_S$ ，因为虚短，所以 $V_{out} = V_{in}$ ，从而可以实现理想电压缓冲：信号复制，且单向传输，隔离负载对信源的影响。

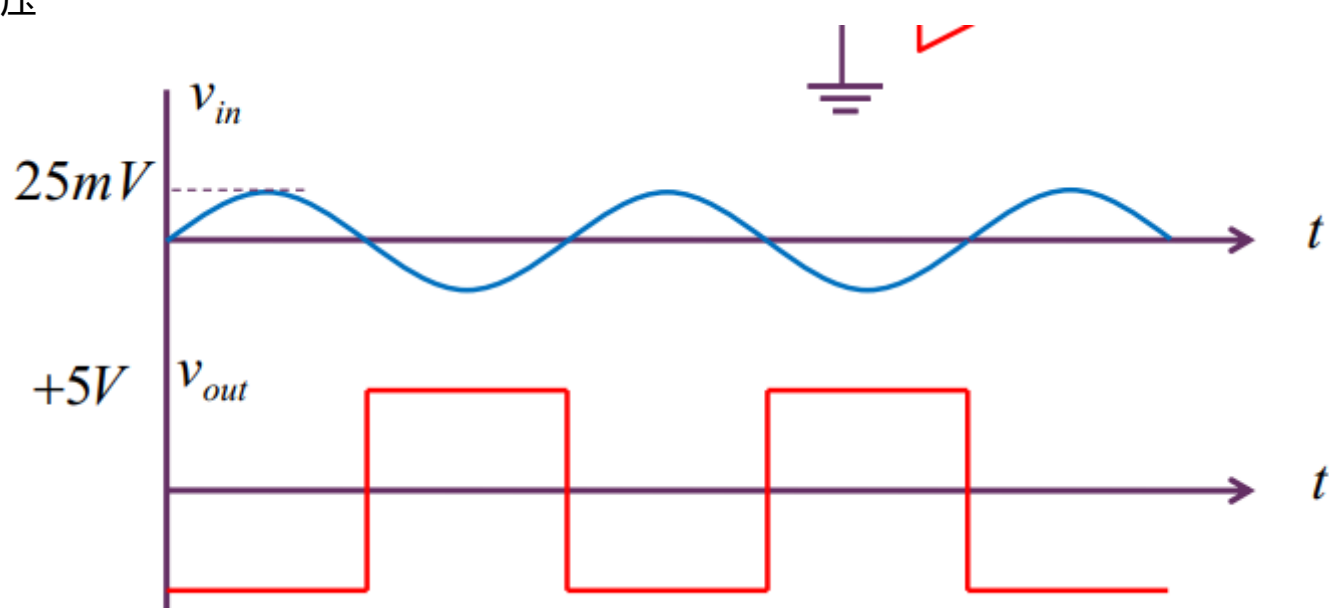


Buffer的等效电路为

2.限幅电路（使用两个齐纳二极管）



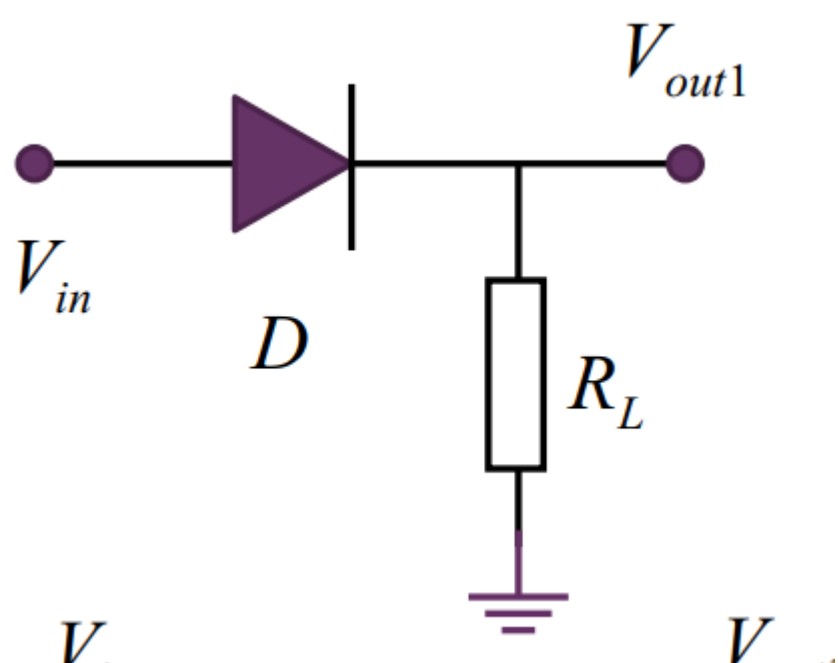
当 $V_{in} > 0$ 时，先假设两个二极管都截止（并未反向击穿），那么此时运放的反向输入端输入正电压，输出负饱和电压，显然二极管导通（反相击穿也是导通 \times ），于是 $0 - V_{out} = 5V$ (两个等效出的电压源串联大约是 $5V$)，所以输出 $-5V$ 电压；
同样分析可得当 $V_{in} < 0$ 时，输出 $+5V$ 电压

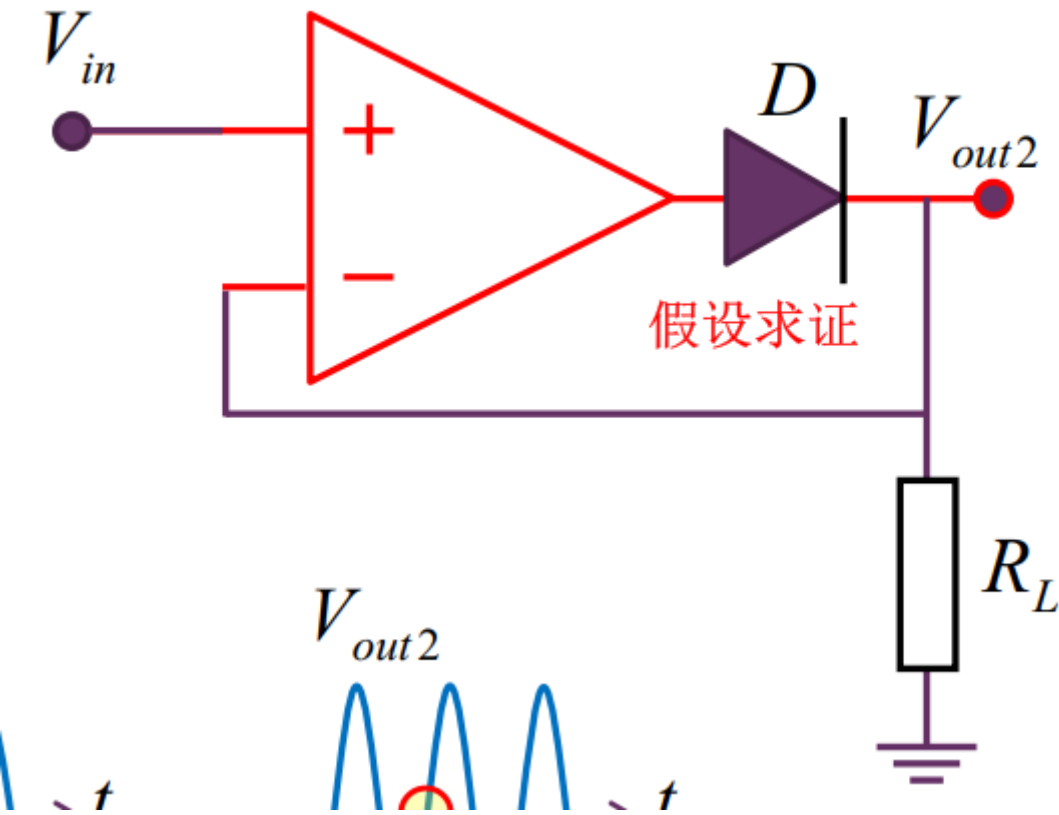


所以限幅电路的输入、输出波形如下：

3. 半波产生：（两个版本）

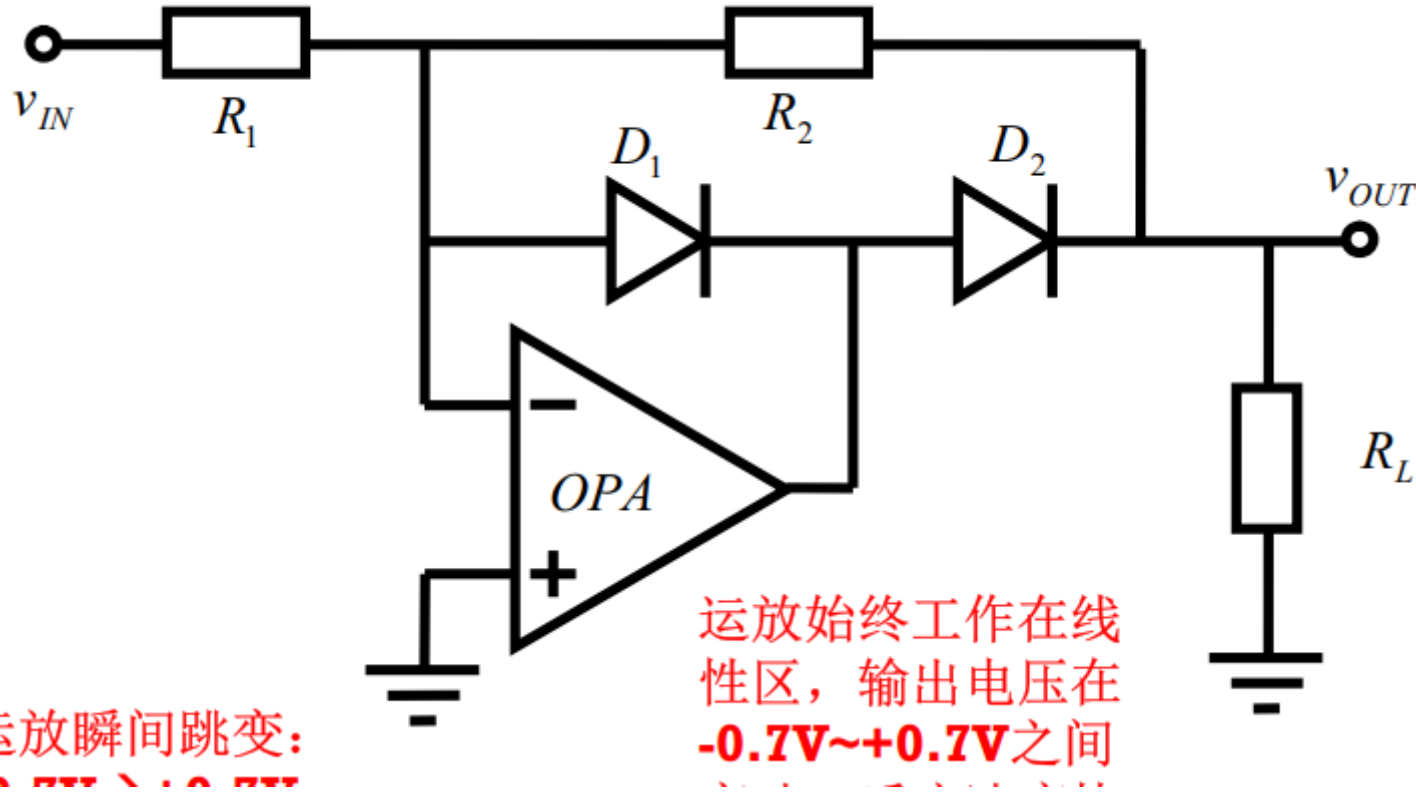
最初的只使用一个二极管的半波产生因为二极管的导通电压（ $0.7V$ ），导致不是真正的半波。





分析可得能够实现 $V_{in} > 0$ ，输出 V_{in} ，反之就输出0V。产生了半波

缺点：运放输出电压跳变较大（ V_{in} 从-到+，输出电压产生了-13V-0.7V的跳变，但是实际过程中因为运放中有寄生电容、补偿电容，所以不能瞬间跳变，导致这部分信号失真严重）



$v_{IN} > 0$	D_1 导通	$v_{OUT} = 0$	$v_{OPA,O} = -0.7V$
$v_{IN} < 0$	D_2 导通	$v_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} v_{IN}$	$v_{OPA,O} = v_{OUT} + 0.7V$

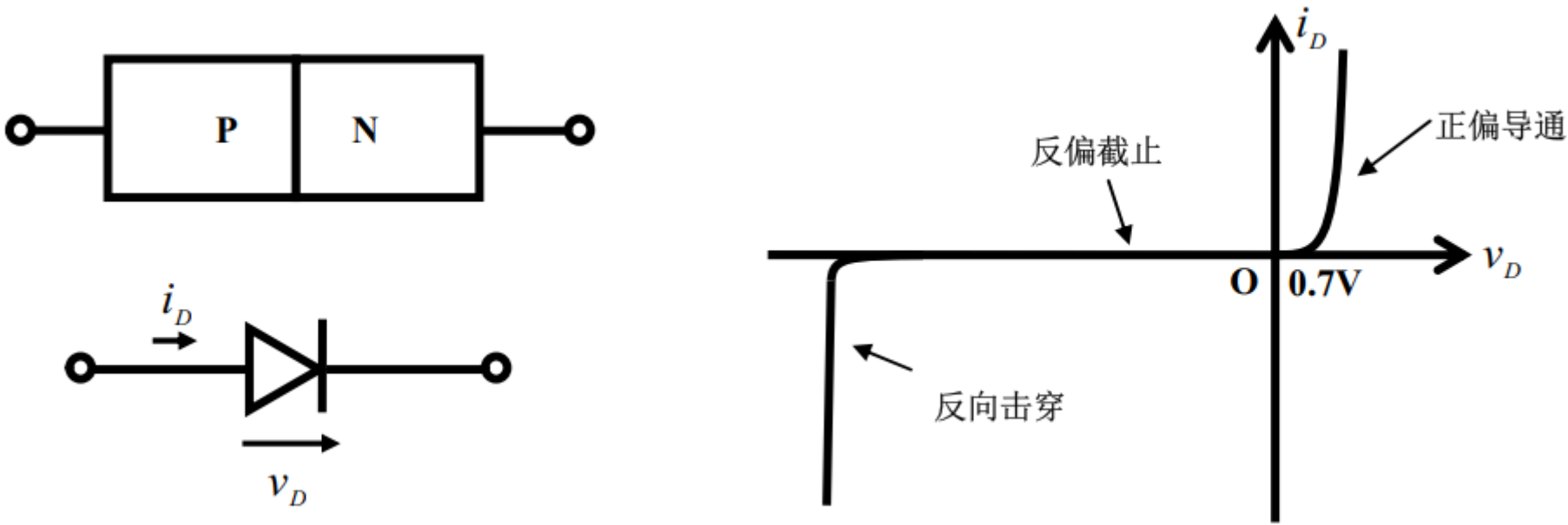
实现了跳变范围的大幅降低，从而带来了更快速的响应，半波信号保持的更好。

运放小结：

- 运算放大器作为一个二端口网络，当工作在线性区时具有极高的电压增益，从而可以抽象出无穷大增益理想运放的虚短、虚断特性，进而大大简化电路分析与设计
- 为了确保运放工作在线性区，需要负反馈连接（只要是负反馈连接（或者同时有正负反馈，但负反馈高于正反馈），就可以假设运放工作于线性区，用理想运放的虚短、虚断特性进行分析）
- （★）负反馈连接的理想运放电路，具有理想受控源特性（比如电压跟随器等，四种理想受控源的实现也需要用到负反馈放大器）

二极管

端口伏安特性



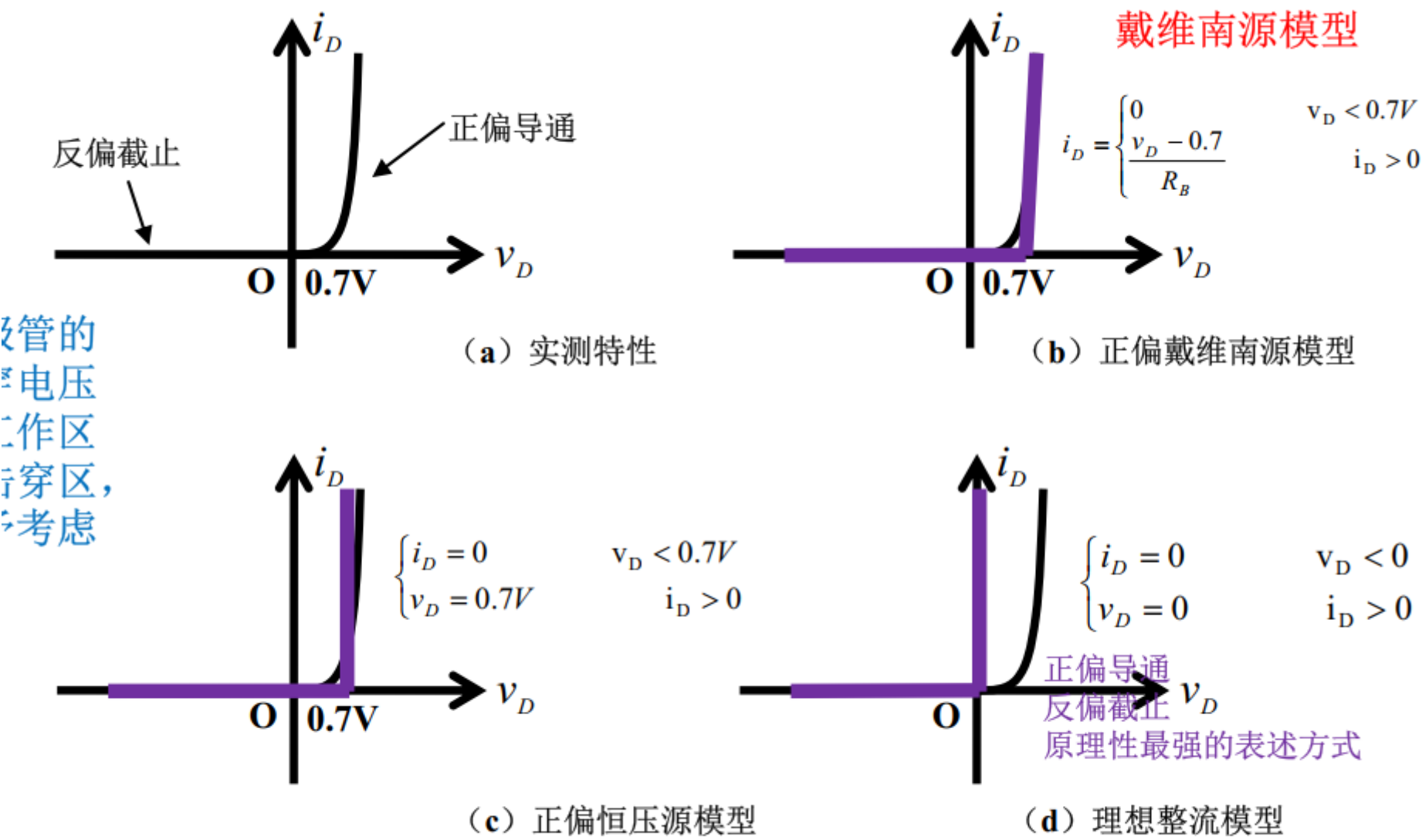
二极管的伏安特性具有明显的三段分区特征：

- 1.正向导通：
在非常接近0的范围内，伏安特性曲线满足 $i_D = I_{S0}(e^{V_D/V_T} - 1)$
微分电阻 $r_d = \frac{V_T}{I_{S0}}$ ，其中 $V_T = 26mV$, I_{S0} 在fA量级
在直流偏置电压较大（大于0.7V）时看成0.7V恒压源（或者直接看作正偏导通短路）
- 2.反偏截止：
反偏截止，视为开路
- 3.反向击穿：
当反向电压超过反向击穿电压时，可以看成是一个恒压源（不是独立源，不满足源关联参考方向）

典型应用：

整流：

整流开关特性的电路建模：

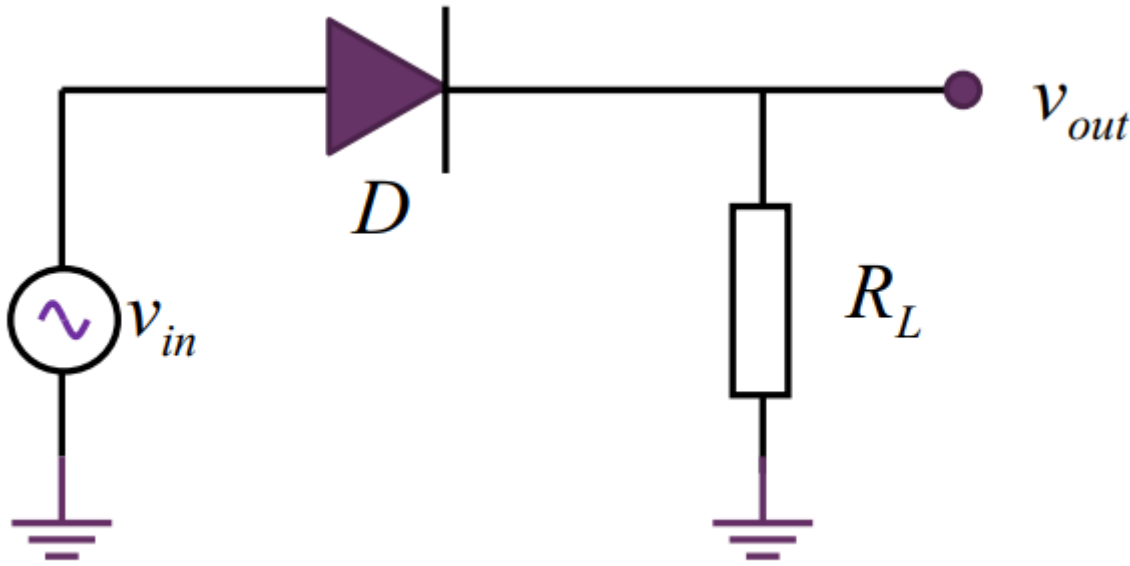


导通0.7V恒压源模型

理想整流模型
最简单，最常用，原理性最强

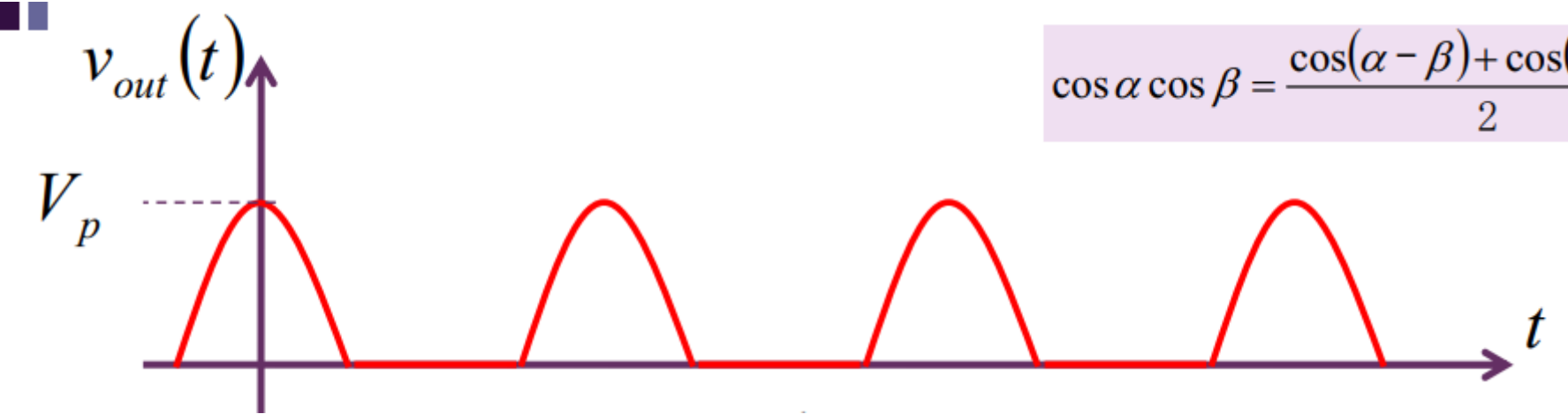
戴维南源不常用，一般使用的是0.7V恒压源模型和短路模型（看被整流的电压幅度和0.7V相比有多大）

- 1. 半波整流:



PS: 反向截止不能击穿

半波信号分析:



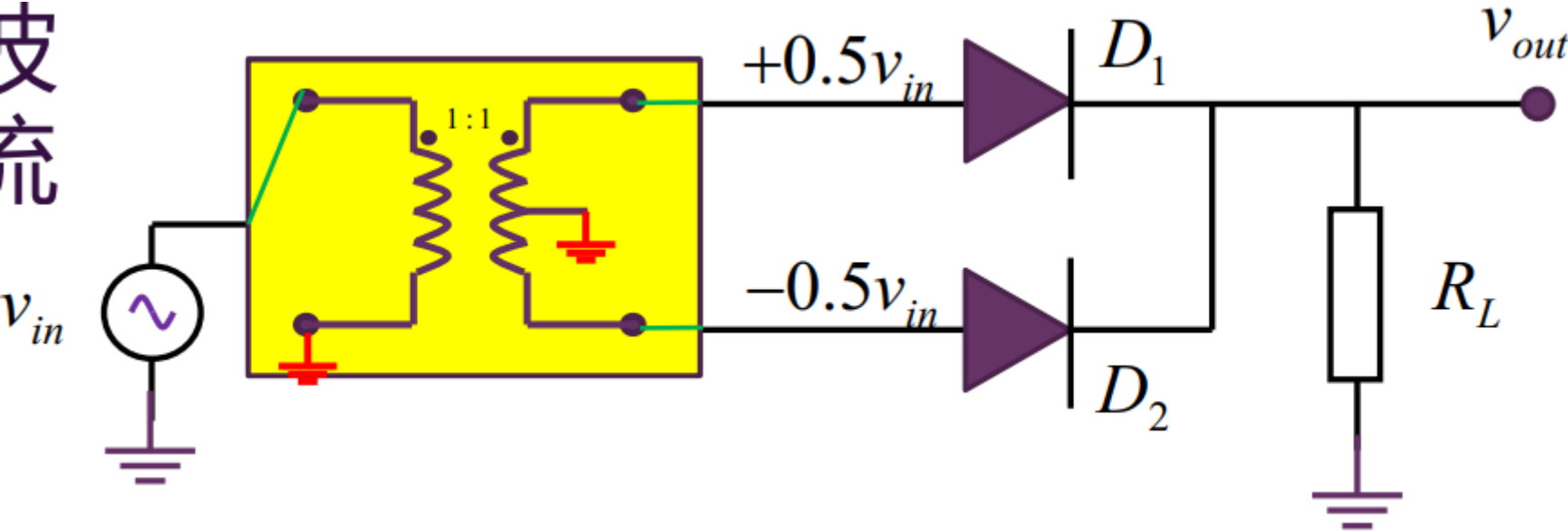
0-1方波开关波形的Fourier展开: $S_1(\omega t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega t - \dots$

所以有

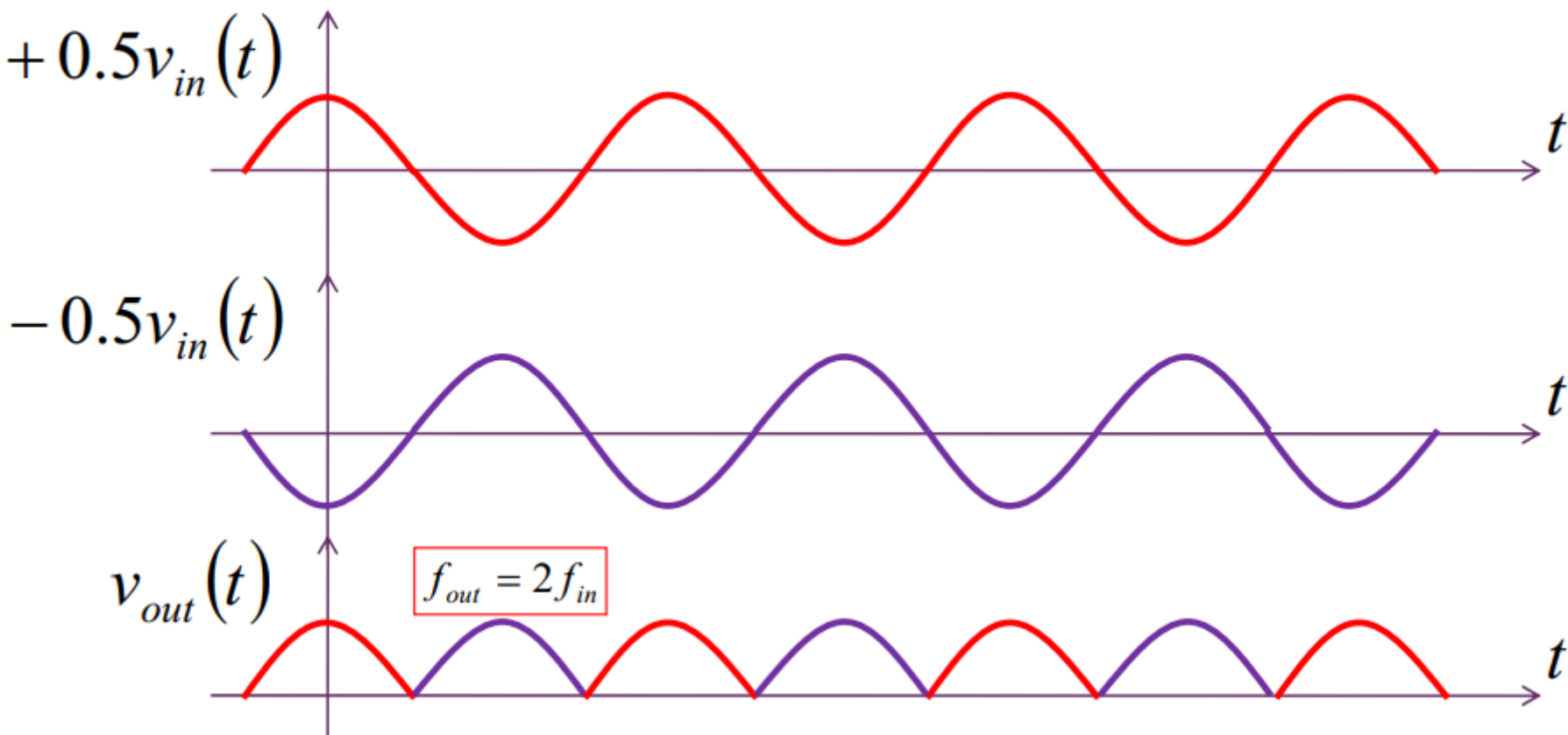
$$\begin{aligned} v_{out}(t) &= \begin{cases} V_p \cos \omega t & \cos \omega t > 0 \\ 0 & \cos \omega t < 0 \end{cases} \\ &= S_1(\omega t) \cdot v_{in}(t) \\ &= \frac{V_p}{\pi} + \frac{V_p}{2} \cos \omega t + \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{V_p}{\pi} \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \end{aligned}$$

于是直流分量是 $\frac{V_p}{\pi}$, 有效值 $V_{rms} = V_p/2$, $f_{out} = f_{in}$

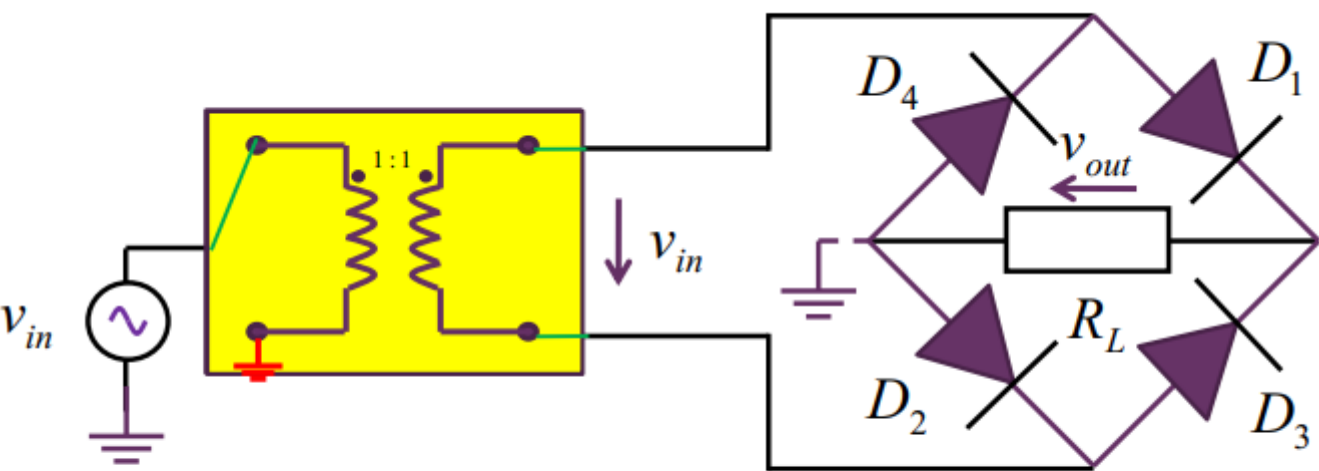
- 全波整流:



分析过程可以把 $0.5v_{in}$ 和 $-0.5v_{in}$ 的图像分别画出来再叠加起来



• 桥式整流：



非平衡电桥：桥中一定可以看到激励

$$v_{out}(t) = \begin{cases} +V_p \cos \omega t & \cos \omega t > 0 \\ -V_p \cos \omega t & \cos \omega t < 0 \end{cases}$$
$$= S_2(\omega t) \cdot v_{in}(t)$$

- 桥式整流器变压器次级线圈电压可以全部用作整流器的输入
- 全波整流器只用了一半电压

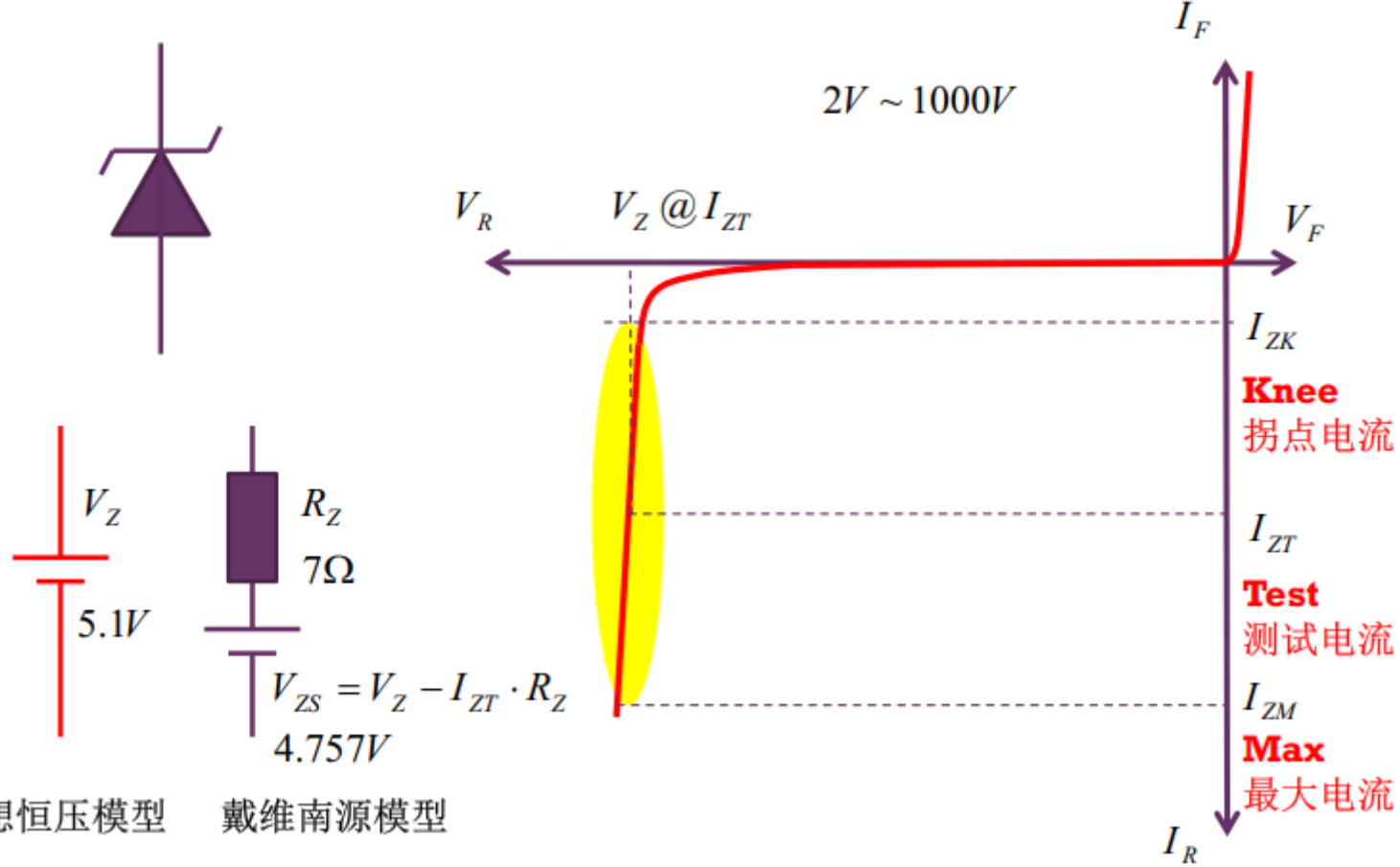
$V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi} = 0.637V_p; V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$

桥式整流器比全波整流器，可以得到两倍的峰值电压、直流电压和有效值电压。但代驾是多用了两个二极管。

三种二极管整流器比较

	半波	全波	桥式
二极管个数	1	2	4
整流器输入	V_P	V_P	V_P
峰值输出（理想）	V_P	$0.5V_P$	V_P
峰值输出（一阶近似）	$V_P-0.7$	$0.5V_P-0.7$	$V_P-1.4$
直流分量/峰值输入	$1/\pi$	$1/\pi$	$2/\pi$
输出周期波形频率	f_{in}	$2f_{in}$	$2f_{in}$

稳流：



等效电路：

二极管小结：

- 利用二极管的特性可以实现：整流、限幅、非线性运算（指数、对数、半波、全波）、数字门、...功能
- 二极管整流器利用二极管“正偏导通、反偏截止”特性实现交流电能到直流电能的转换
- 二极管稳压器利用二极管“反向击穿”恒压特性实现直流稳压功能（直流到直流电能的转换）
- 分析二极管应该首先假定二极管是截止的，然后分析是否满足假设。当二极管数目较多时，还可能多次假设。直到没有矛盾为止。