

电子电路与系统基础I

理论课第十四讲 运算放大器应用

李国林

清华大学电子工程系

运算放大器应用 大纲

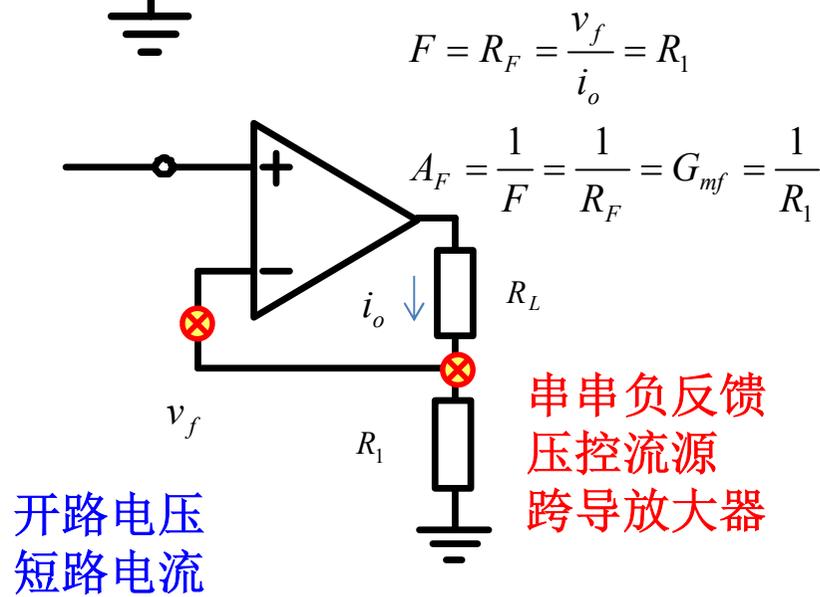
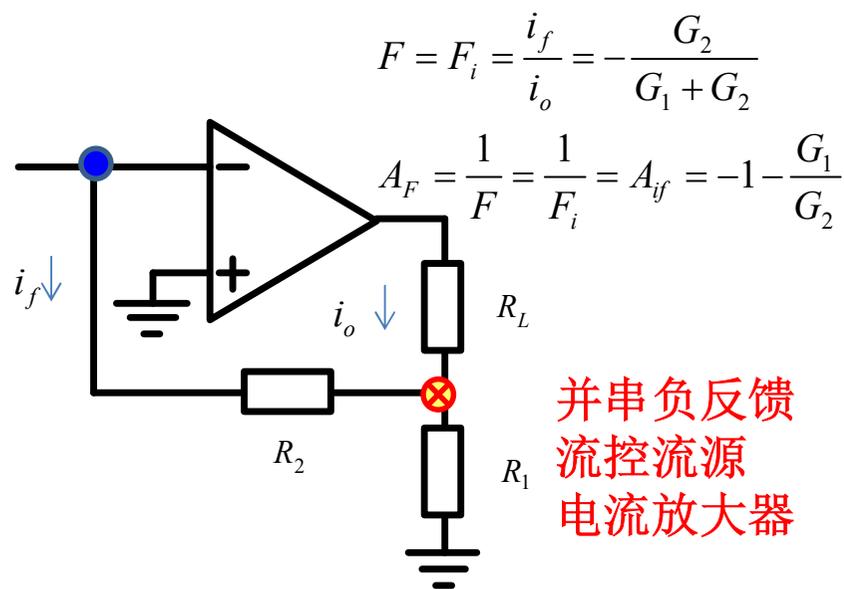
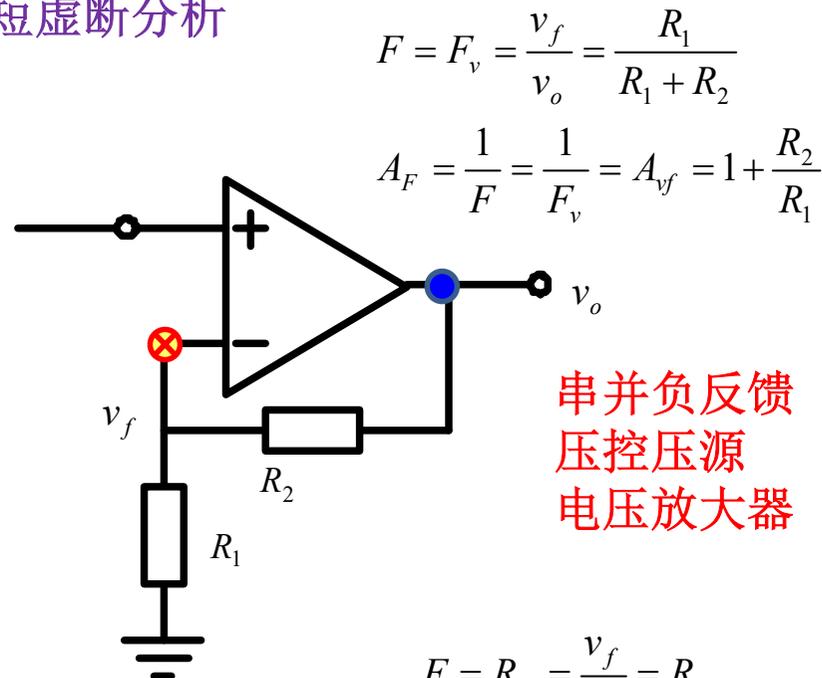
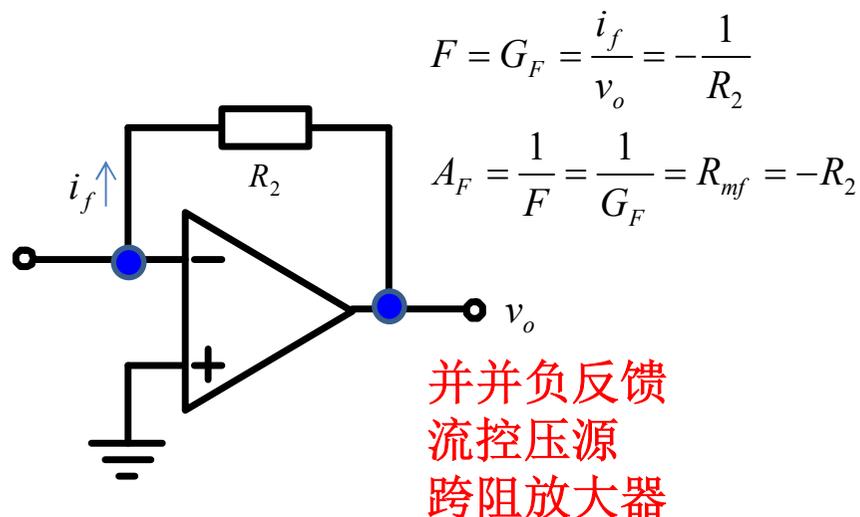
- 运算放大器及其外端口特性
- 理想运算放大器特性
- 负反馈线性应用
 - 四种负反馈放大器
- 线性应用
- 非线性应用

一、负反馈线性应用

- 理想受控源
 - 四种负反馈类型，四种接近理想的受控源
- 加法电路
 - 源自反相放大电路
 - **Mixer、DAC**
- 电压跟随器
 - 源自同相放大电路
- 差分放大电路
 - 同时有反相和同相放大电路
- 调制与解调
 - 可用开关切换增益大小（规定不同的输入：非线性/时变线性）
- 多运放负反馈分析
 - 确保负反馈，则可虚短和虚断分析

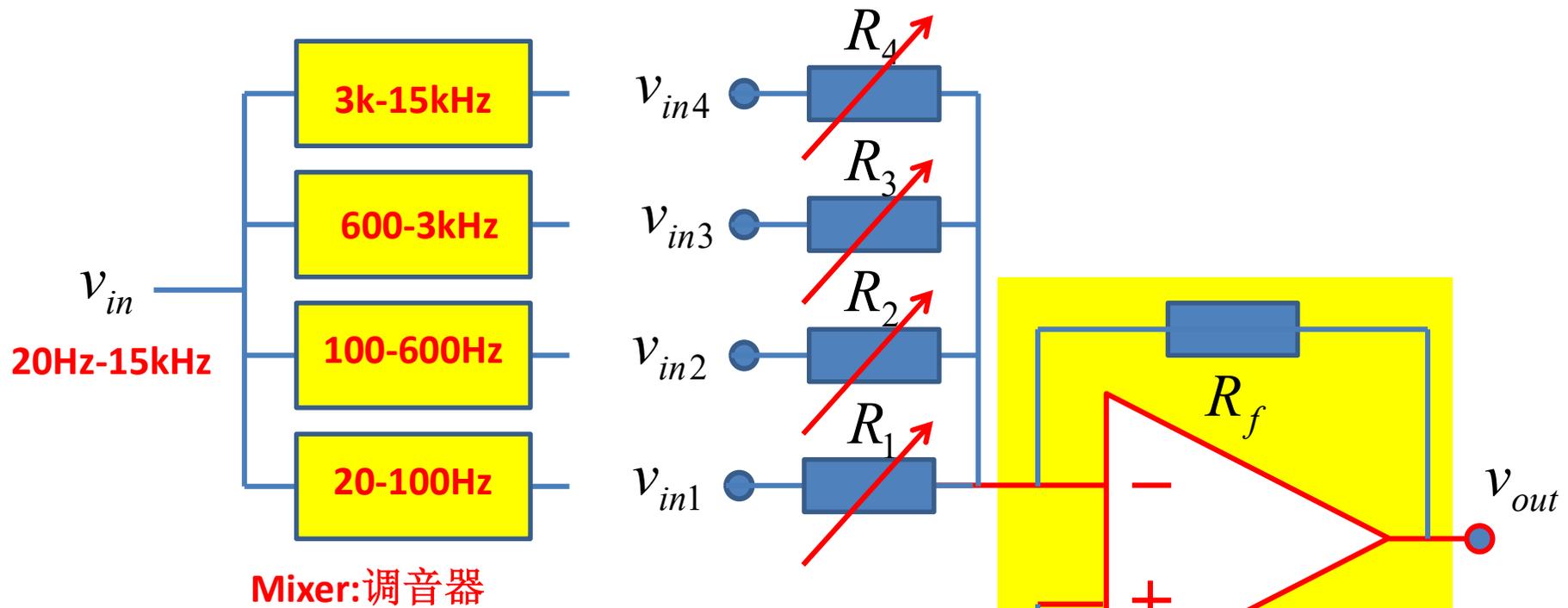
1.1 四种反馈连接方式，四种受控源

自行进行虚短虚断分析



1.2 加法电路

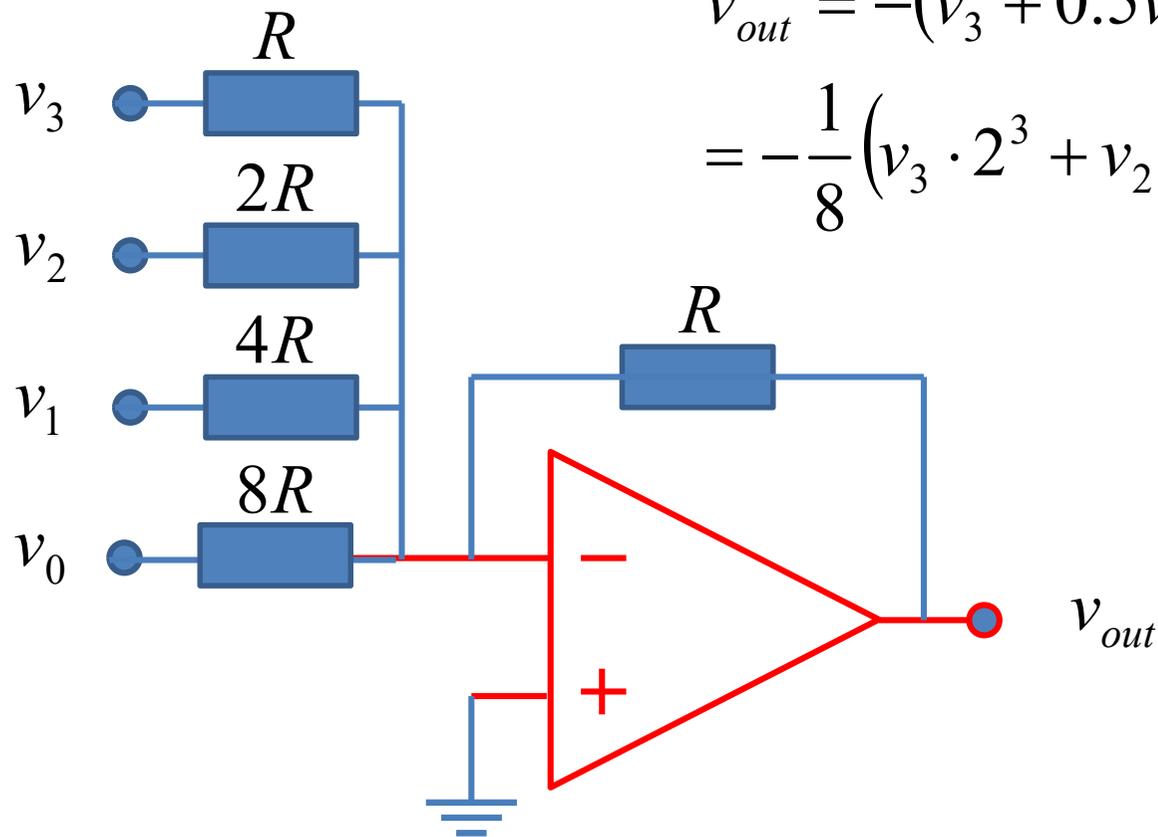
inverting summing amplifier



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

二进制加权转换

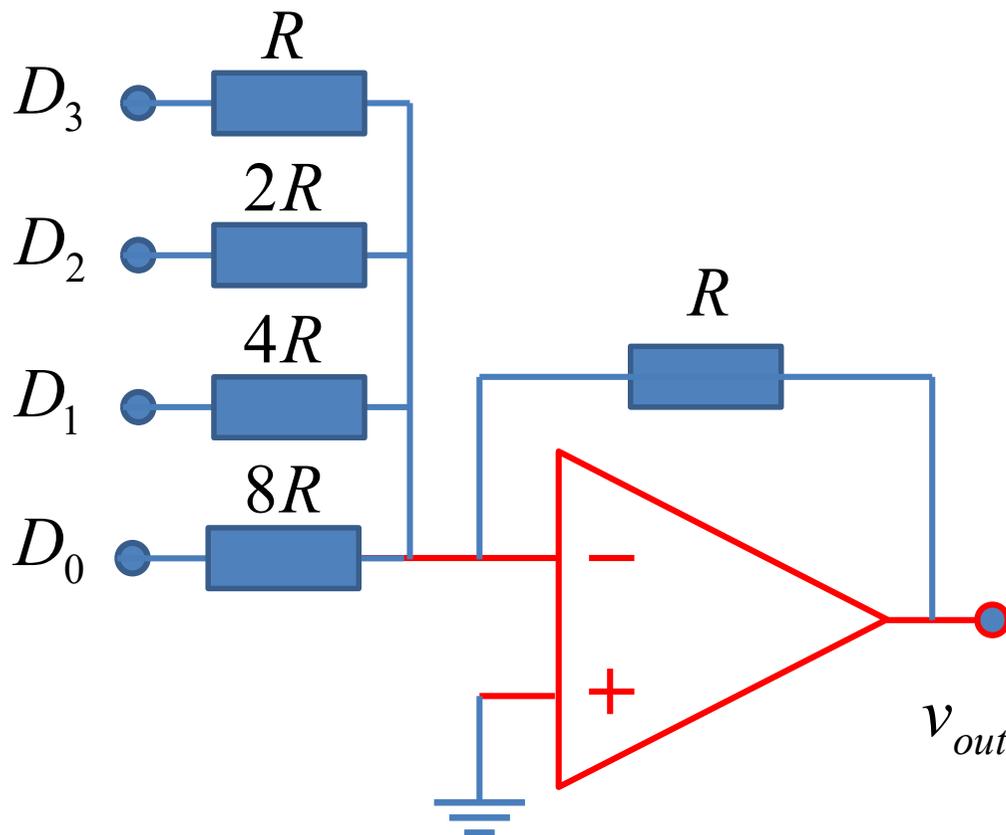
电阻越小，权重越大



$$v_{out} = -(v_3 + 0.5v_2 + 0.25v_1 + 0.125v_0)$$
$$= -\frac{1}{8}(v_3 \cdot 2^3 + v_2 \cdot 2^2 + v_1 \cdot 2^1 + v_0 \cdot 2^0)$$

二进制加权DAC: Digital to Analog Converter

Binary-weighted D/A converter

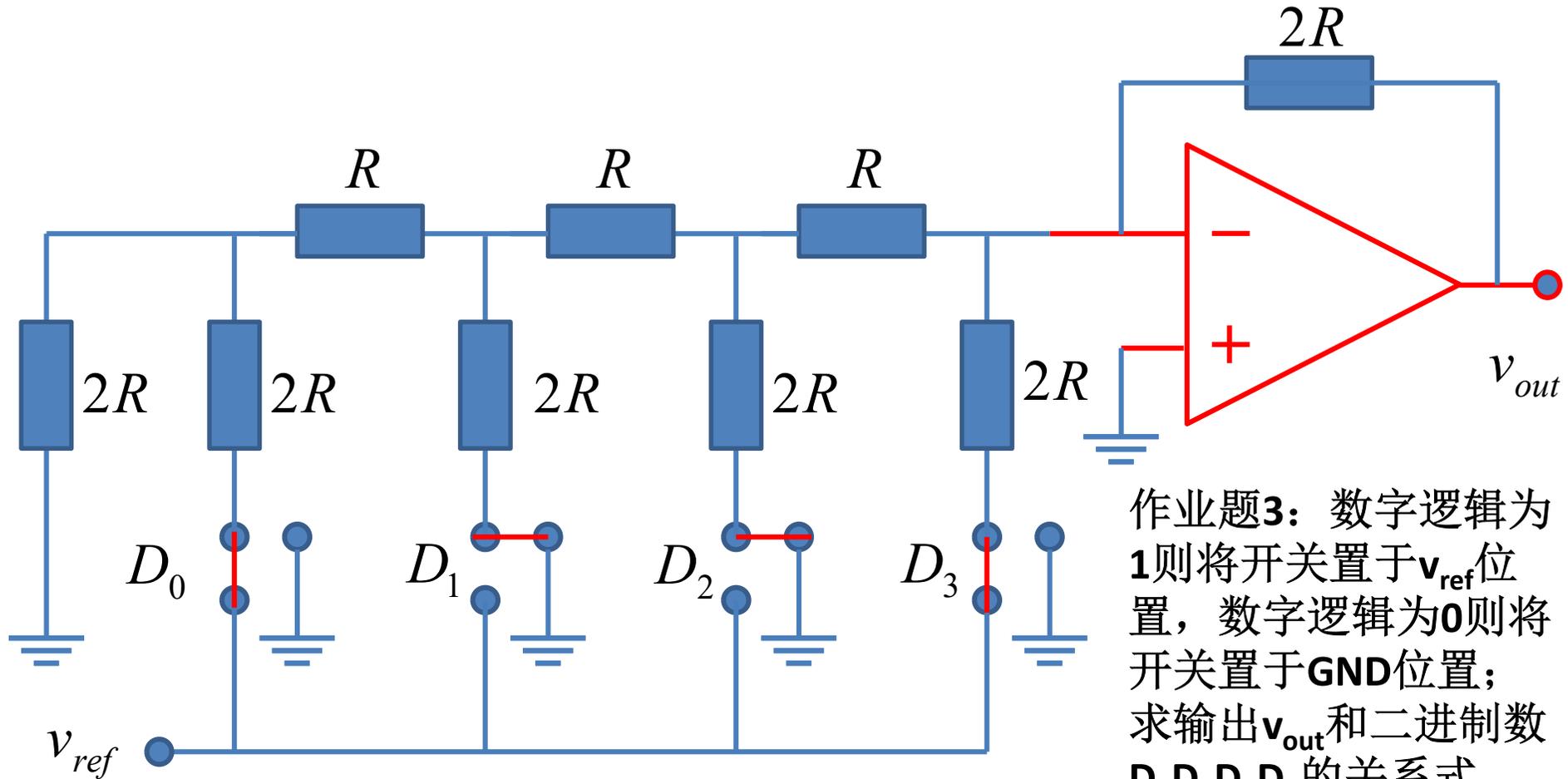


0:	0000:	0V
1:	0001:	-0.125V
2:	0010:	-0.25V
3:	0011:	-0.375V
4:	0100:	-0.5V
5:	0101:	-0.625V
6:	0110:	-0.75V
7:	0111:	-0.875V
8:	1000:	-1V
9:	1001:	-1.125V
10:	1010:	-1.25V
11:	1011:	-1.375V
12:	1100:	-1.5V
13:	1101:	-1.625V
14:	1110:	-1.75V
15:	1111:	-1.875V

$$v_{out} = -\frac{1}{8} (D_3 \cdot 2^3 + D_2 \cdot 2^2 + D_1 \cdot 2^1 + D_0 \cdot 2^0) = -\frac{1}{2^3} \sum_{k=0}^3 D_k 2^k$$

数字模拟线性转换关系

R/2R ladder D/A converter

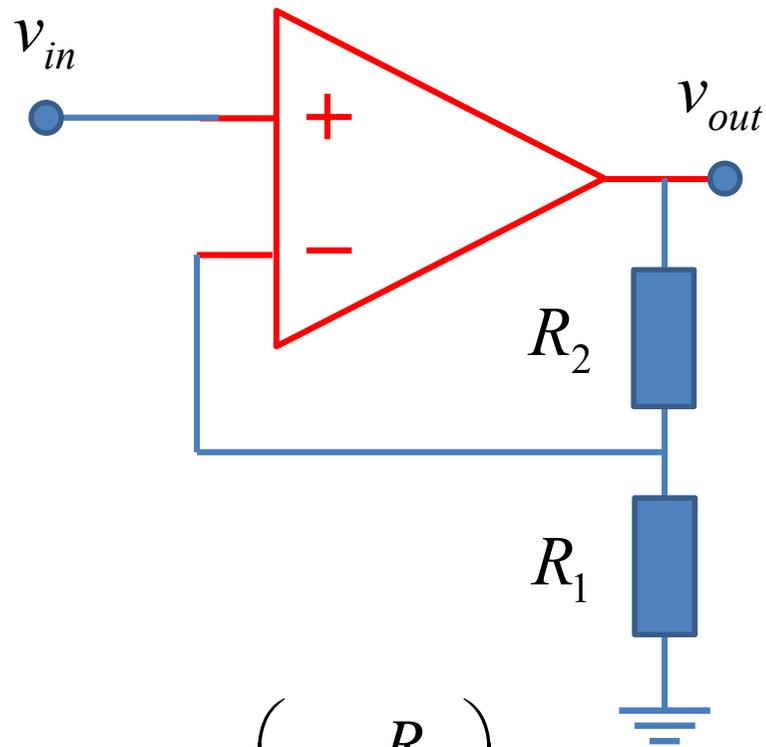


将 D_0 - D_3 处理为电压源，...

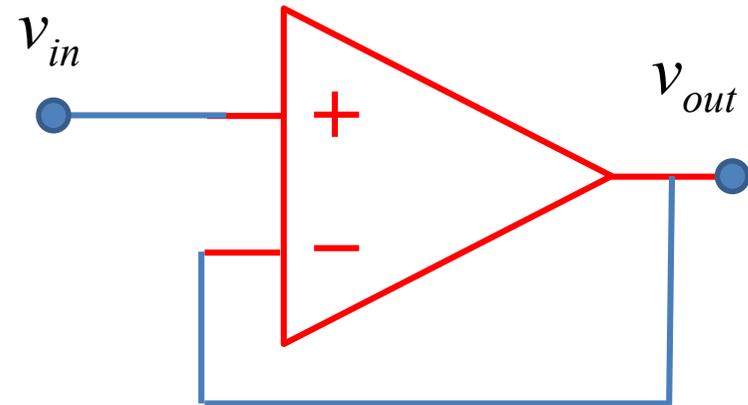
作业题3：数字逻辑为**1**则将开关置于 v_{ref} 位置，数字逻辑为**0**则将开关置于**GND**位置；求输出 v_{out} 和二进制数 $D_3D_2D_1D_0$ 的关系式。当开关如图所示时，二进制数是多少？对应输出电压为多少？假设 $v_{ref}=5V$ 。

1.3 电压跟随器

Voltage Follower



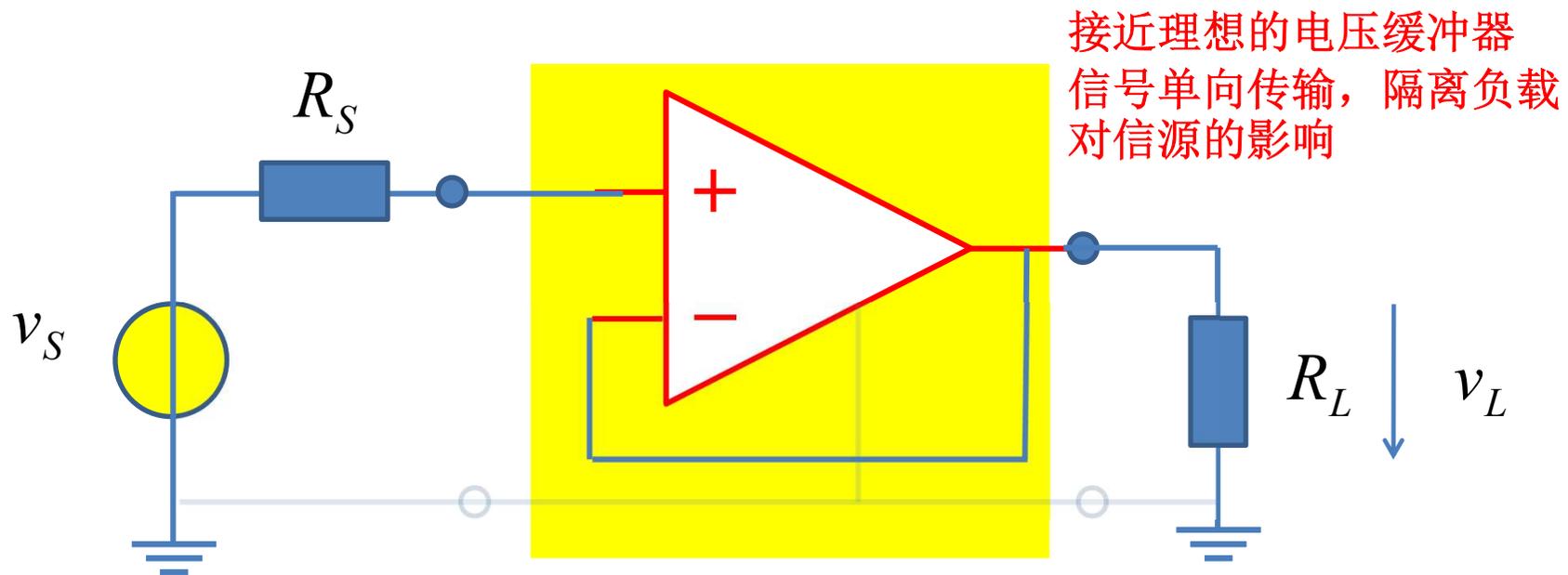
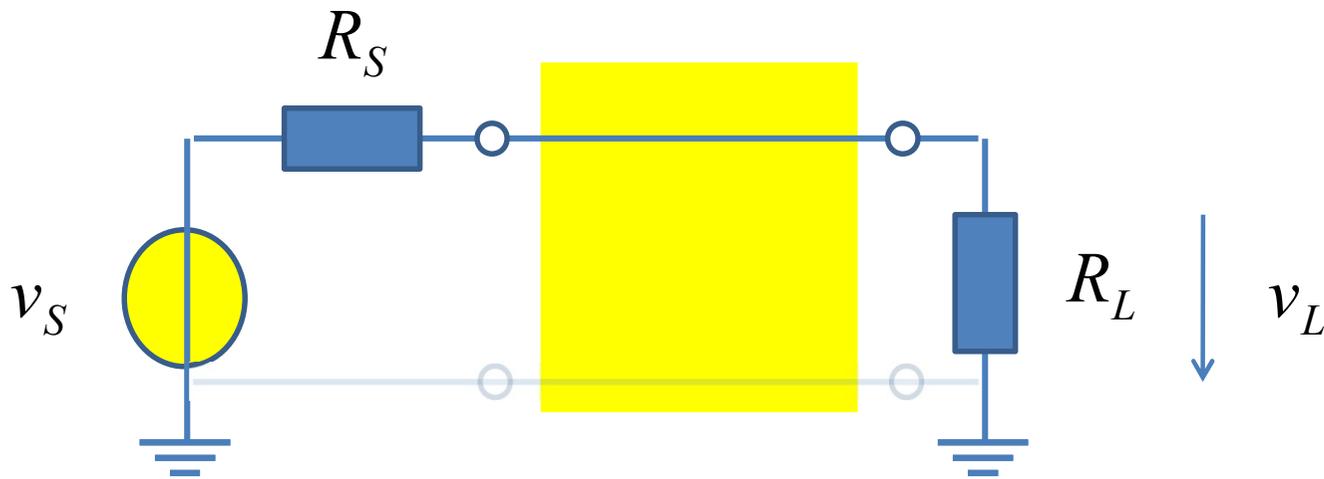
$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v_{in}$$



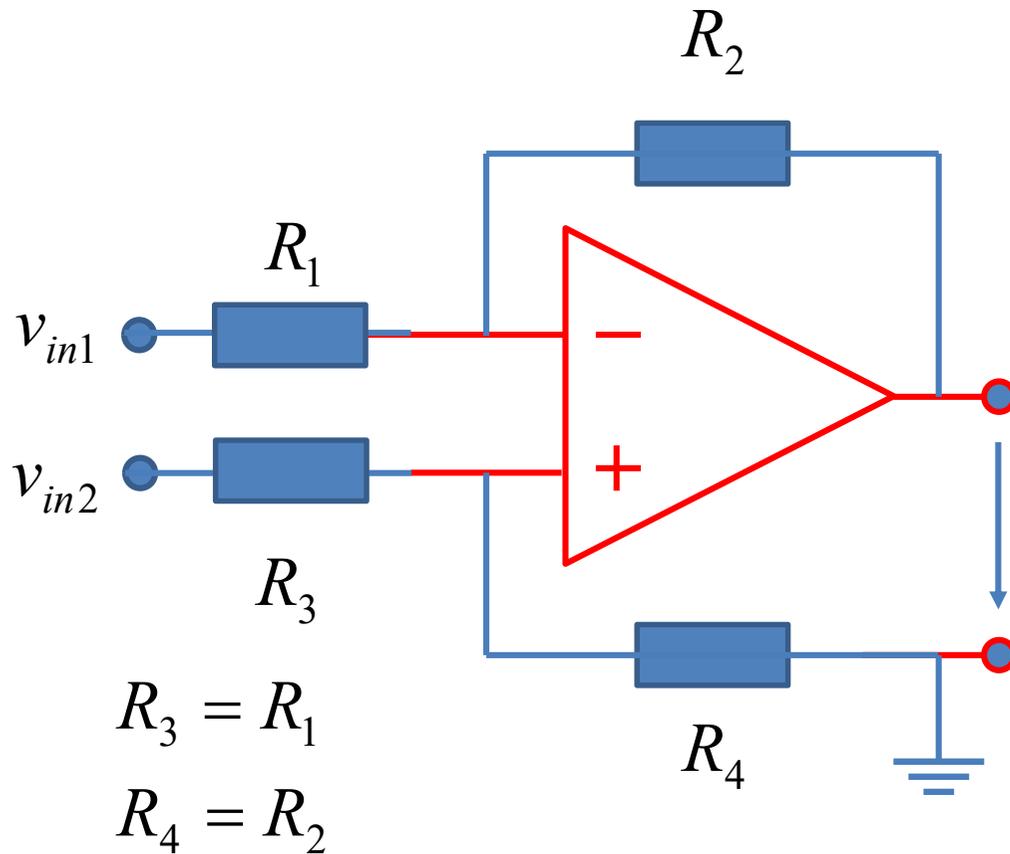
$$v_{out} = v_{in}$$

跟随器有什么用处？
输入输出直通不行吗？

缓冲器 Buffer



1.4 差分放大器 Differential Amplifier



$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1} (v_{in2} - v_{in1})$$

$$= \frac{R_2}{R_1} v_{id} + 0 \cdot v_{ic}$$

- 差分放大器，可有效抑制共模信号

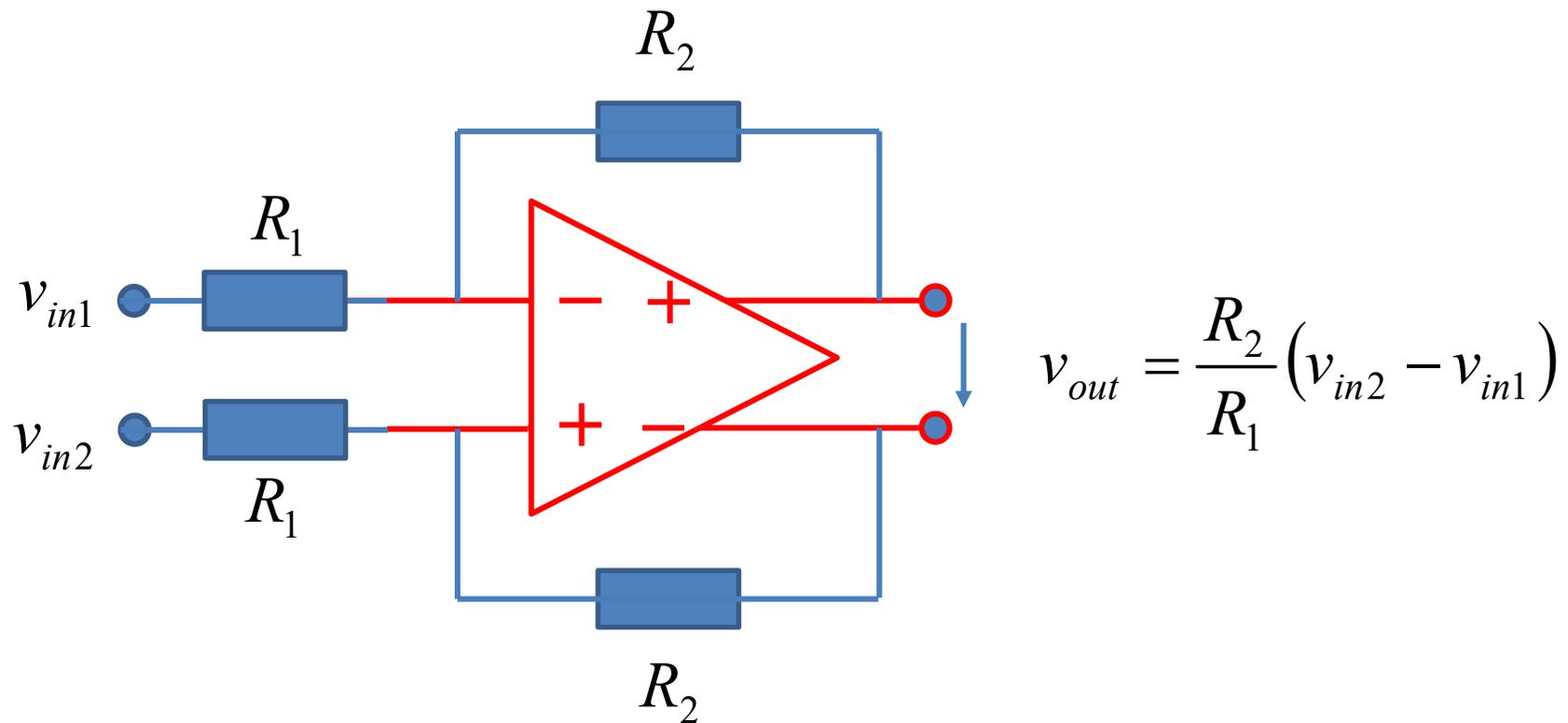
差模信号 $v_{id} = v_{in2} - v_{in1}$

共模信号 $v_{ic} = \frac{v_{in2} + v_{in1}}{2}$

$$v_{in2} = v_{ic} + 0.5v_{id}$$

$$v_{in1} = v_{ic} - 0.5v_{id}$$

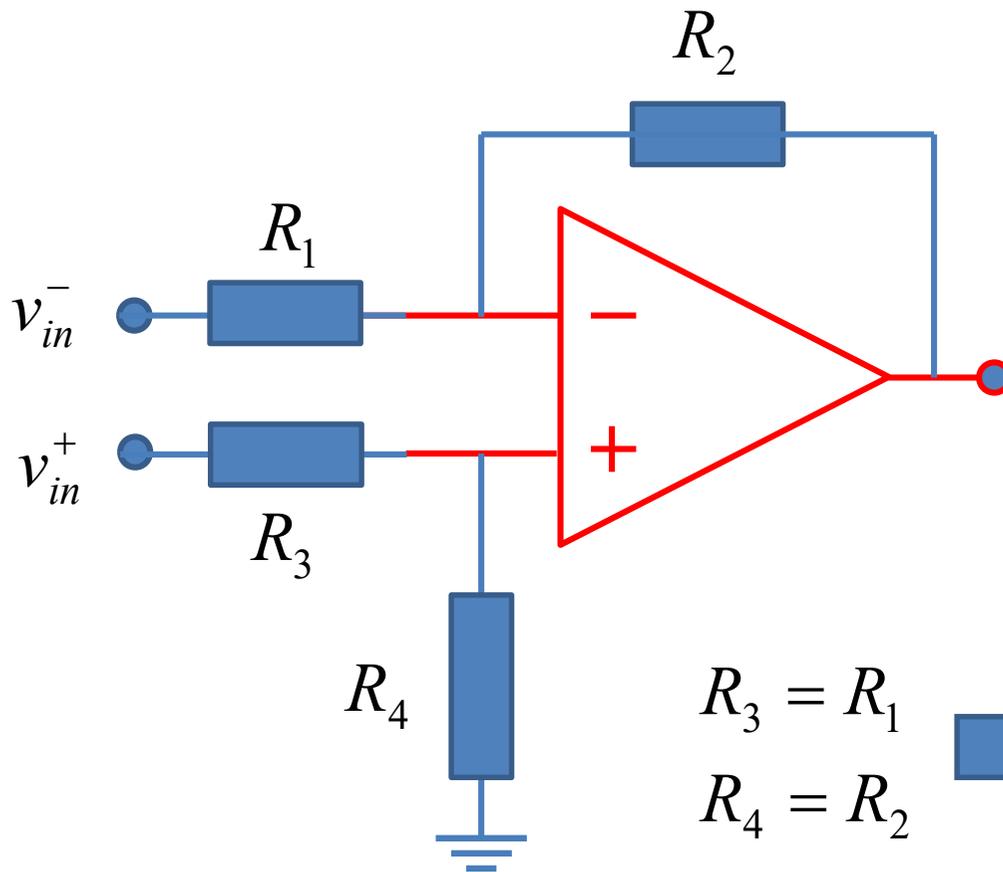
全差分放大器FDA Fully Differential Amplifier



全差分放大器，在输出端也同样对共模干扰信号进行抑制，
在数模混合集成电路中大量采用

CMRR

- 理想的差分放大器原则上可以有效抑制共模信号
- 失配导致共模信号并不能完全被抑制
 - 事实上，失调、共模放大电压的存在，都是因为运放输入端不对称（失配）导致的
- 即使运放是理想的，外部电阻值不对称也会导致有限的CMRR



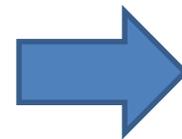
$$v_{out} = A_v^- \cdot v_{in}^- + A_v^+ \cdot v_{in}^+$$

$$A_v^- = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_v^+ = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$R_3 = R_1$$

$$R_4 = R_2$$



$$A_v^+ = \frac{R_2}{R_1}$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = \left| \frac{R_2/R_1}{0} \right| = \infty$$

$$v_{out} = \frac{R_2}{R_1} (v_{in}^+ - v_{in}^-) = A_{vd} v_{id} + A_{vc} v_{ic}$$

外部电阻非理想引入的CMRR

$$v_{out} = A_v^- \cdot v_{in}^- + A_v^+ \cdot v_{in}^+$$

$$A_v^- = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A_v^+ = \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$v_{in}^+ = v_c + 0.5v_d$$

$$v_{in}^- = v_c - 0.5v_d$$

$$R_1 = R_{10}(1 + \delta_1) \quad R_2 = R_{20}(1 + \delta_2)$$

$$R_3 = R_{10}(1 + \delta_3) \quad R_4 = R_{20}(1 + \delta_4)$$

$$|\delta_1|, |\delta_2|, |\delta_3|, |\delta_4| < 5\% = \delta_{\max}$$

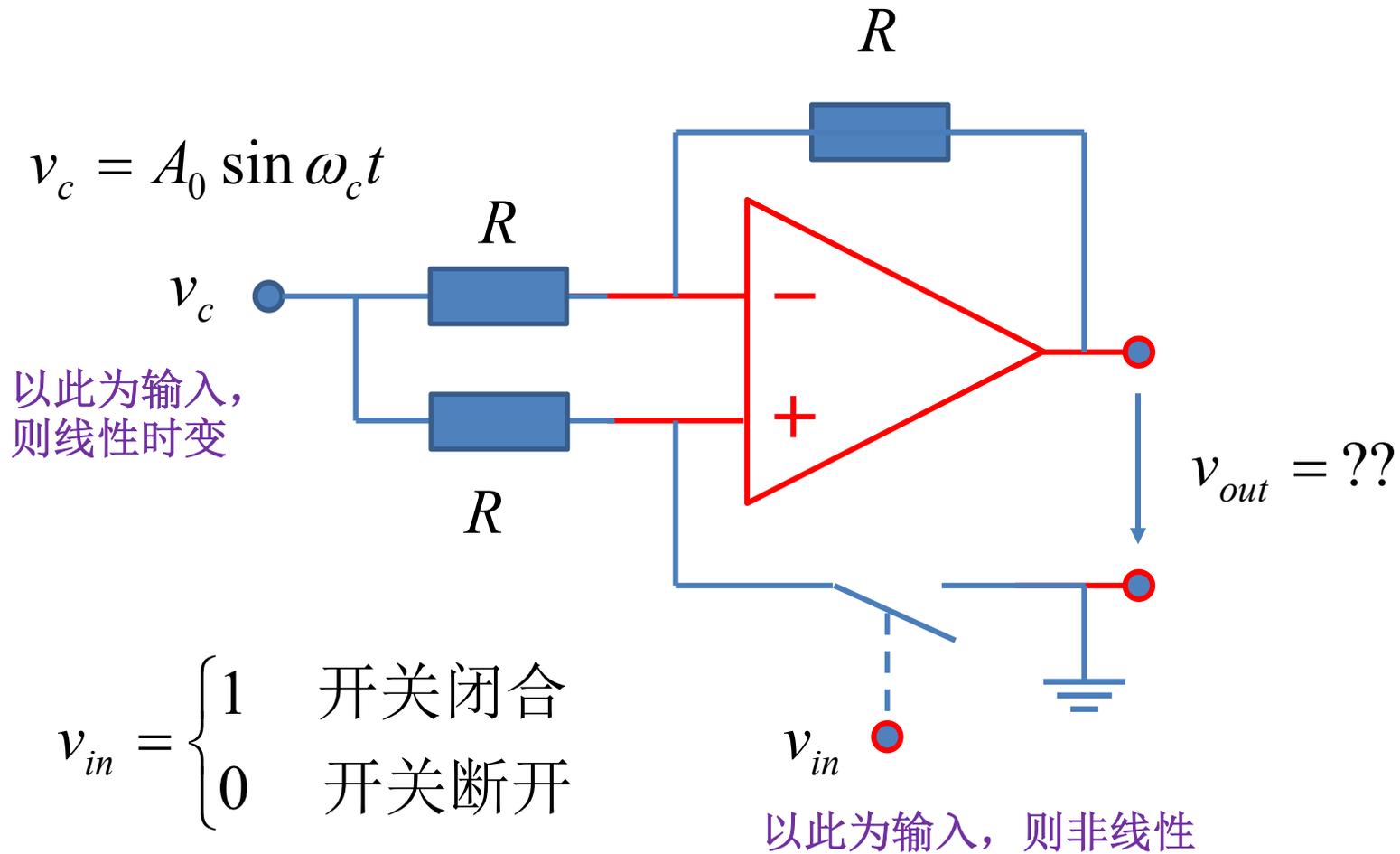
$$v_{out} = A_{vd}v_d + A_{vc}v_c$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$

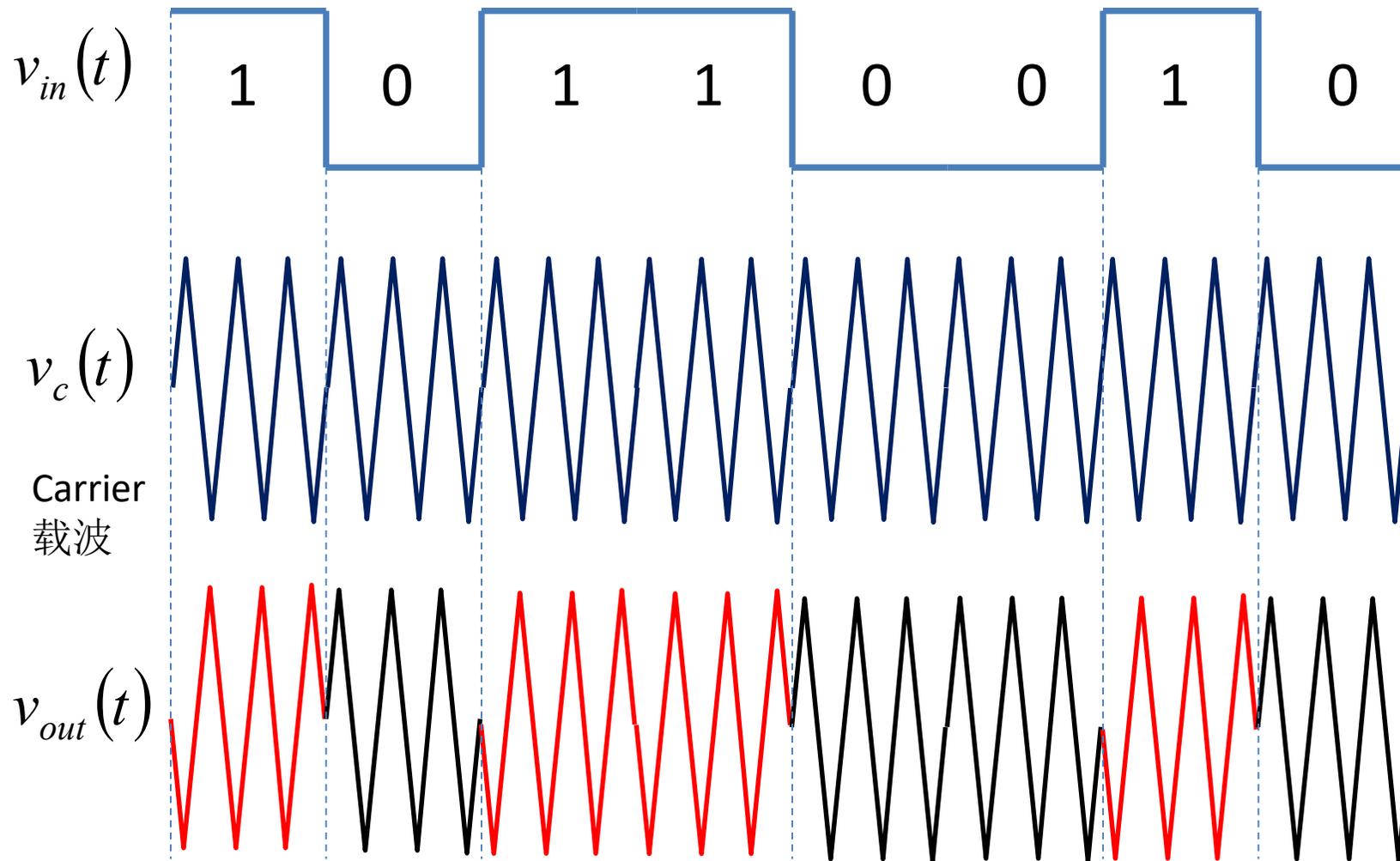
$$CMRR_{\min} = \frac{1}{4\delta_{\max}}$$

作业题3：要想获得80dB的CMRR，对外部电阻精度提出什么要求？

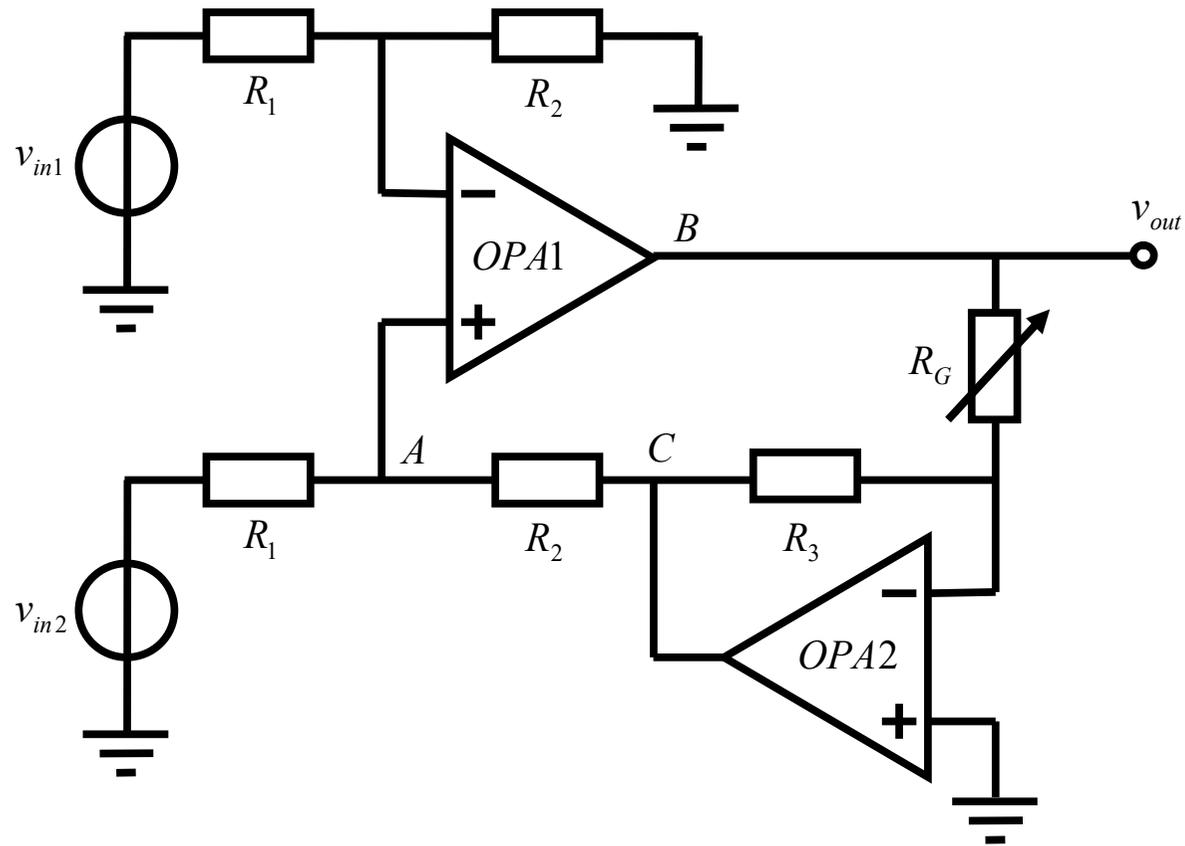
1.5 简单调制电路



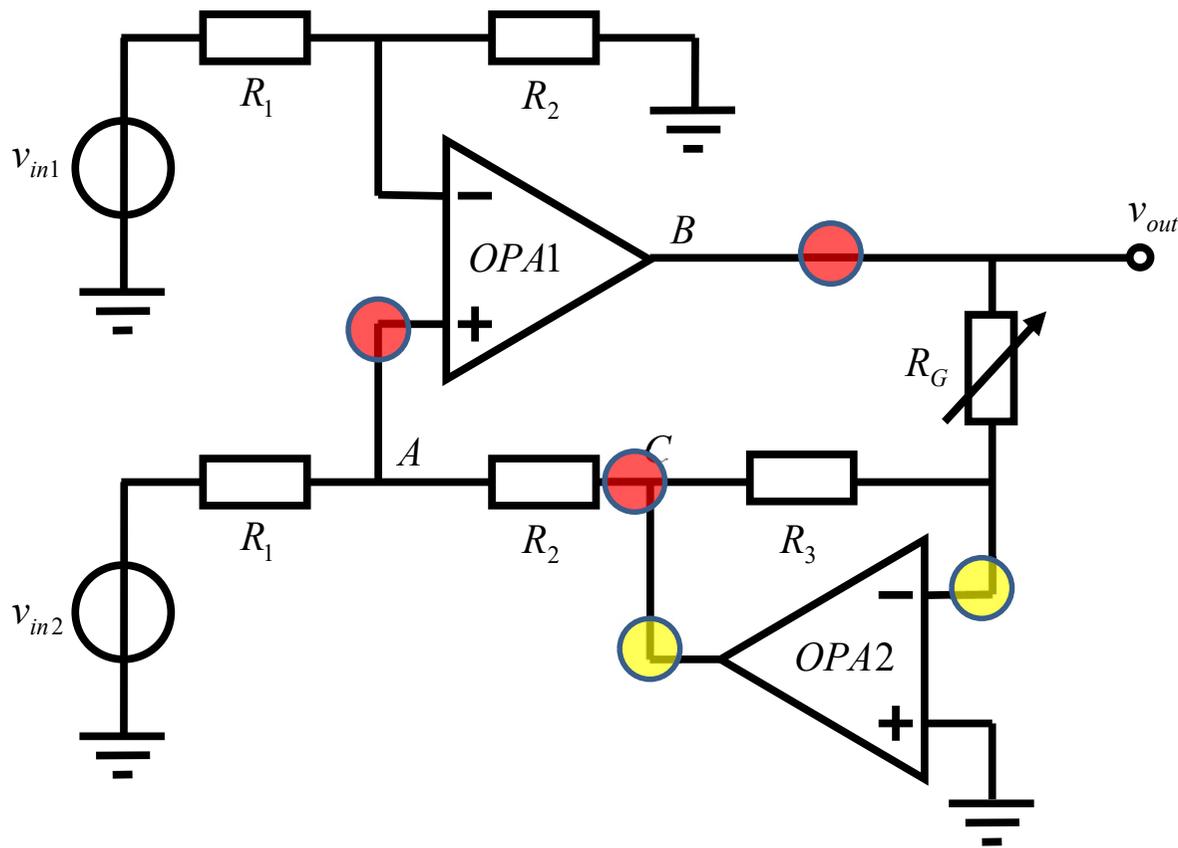
调制 modulation



1.6 多运放负反馈分析



第一步：确认负反馈



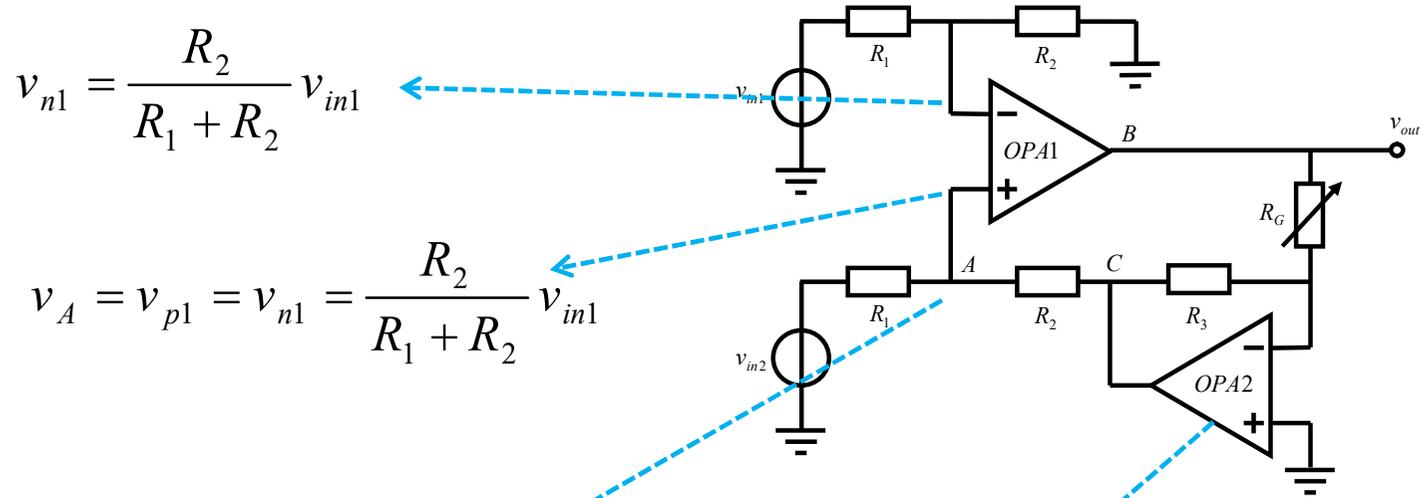
分析负反馈时，所有输入激励都不起作用（交流置零）

如果是负反馈，工作区即可假设在线性区，用虚断和虚短进行分析

复杂负反馈连接方式不要分析连接类型，只需用虚短、虚断分析即可

第二步

虚短虚断分析



$$v_{n1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{in1}$$

$$v_A = v_{p1} = v_{n1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_{in1}$$

$$i = \frac{v_A - v_{in2}}{R_1} = \frac{v_C - v_A}{R_2}$$

$$v_C = -\frac{R_3}{R_G} v_B = -\frac{R_3}{R_G} v_{out}$$

$$v_C = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_A - \frac{R_2}{R_1} v_{in2} = \frac{R_2}{R_1} (v_{in1} - v_{in2})$$

$$v_C = \frac{R_2}{R_1} (v_{in1} - v_{in2}) = -\frac{R_3}{R_G} v_{out}$$

$$v_{out} = \frac{R_G}{R_3} \frac{R_2}{R_1} (v_{in2} - v_{in1})$$

增益可调的差分放大器

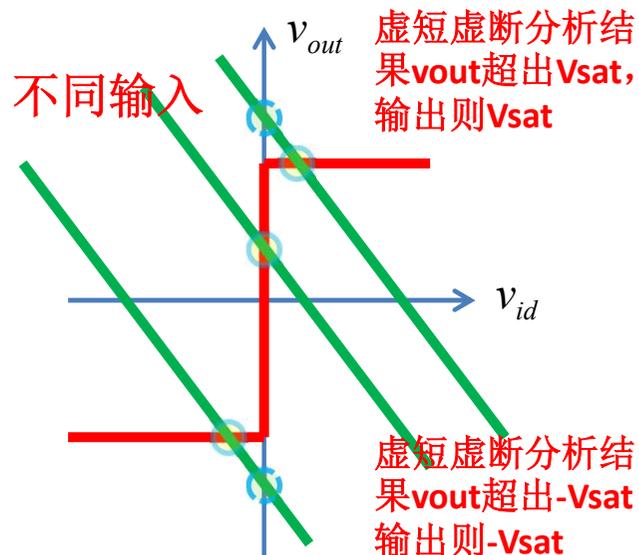
带反馈运放的分析要点

- 首先确认负反馈，如果确实是负反馈，就可假设工作在线性区，虚短、虚断分析结果表明 v_{out} 确实位于正负饱和电压之间，则假设无误

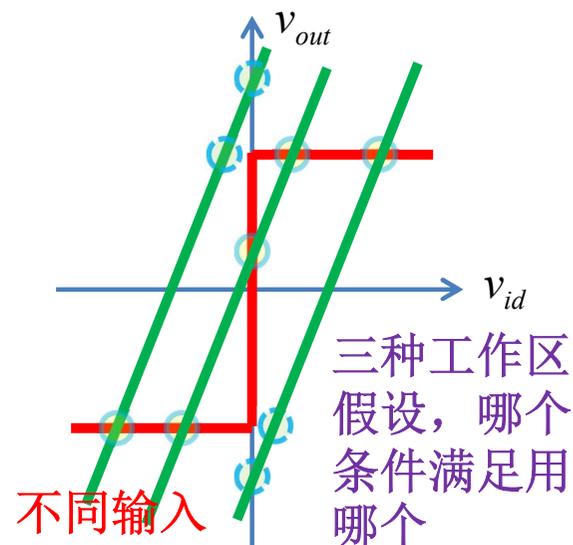
- 如果超出，则输出饱和
- 线性反馈网络具有唯一解

- 如果确认是正反馈，则需分别假设工作在正饱和区、负饱和区、线性区，分别验证结果是否符合假设，如果符合，则假设无误

- 即使是线性反馈网络，也存在多解的可能性



线性负反馈：只有一个交点



线性正反馈：可能有多个交点

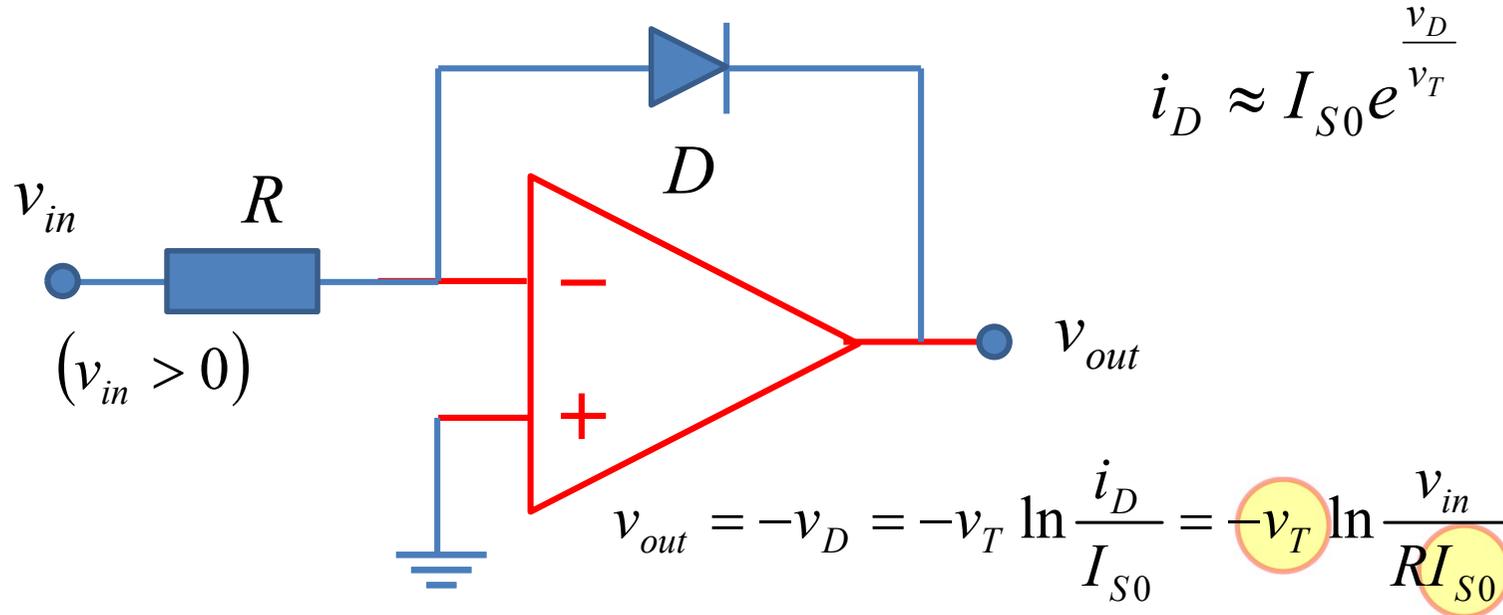
二、非线性应用

- 负反馈+非线性元件
 - 运放线性区+非线性元件
 - 对数运算
 - 输出限幅
 - 半波信号产生
 - 开环
 - 运放饱和区
 - 比较器
 - 正反馈
 - 运放饱和区可能性大，线性区也有一定的可能性
 - 施密特触发器
 - 负阻
- 正反馈: **positive feedback**
 - 正反馈是导致行为后果进一步加强的反馈
 - 假设初始线性区，其输出幅度将呈现指数增长规律，从而最终脱离线性区
 - **positive runaway**
 - 指数增长电压电流会导致器件进入**非线性工作区**
 - 依靠非线性的负反馈机制，系统最终会稳定下来
 - 电阻正反馈网络，则一般进入饱和状态: **saturation**: 进入饱和区: 或者闩锁状态: **latch**: 锁定在某个饱和区
 - 动态元件反馈网络，或者进入振荡状态: **oscillation**: 张弛、正弦振荡均有可能
 - 也有可能非线性正反馈机制得以加强，系统最终损坏
 - 呈现出热损毁: **thermal runaway**: 个别设计不过关

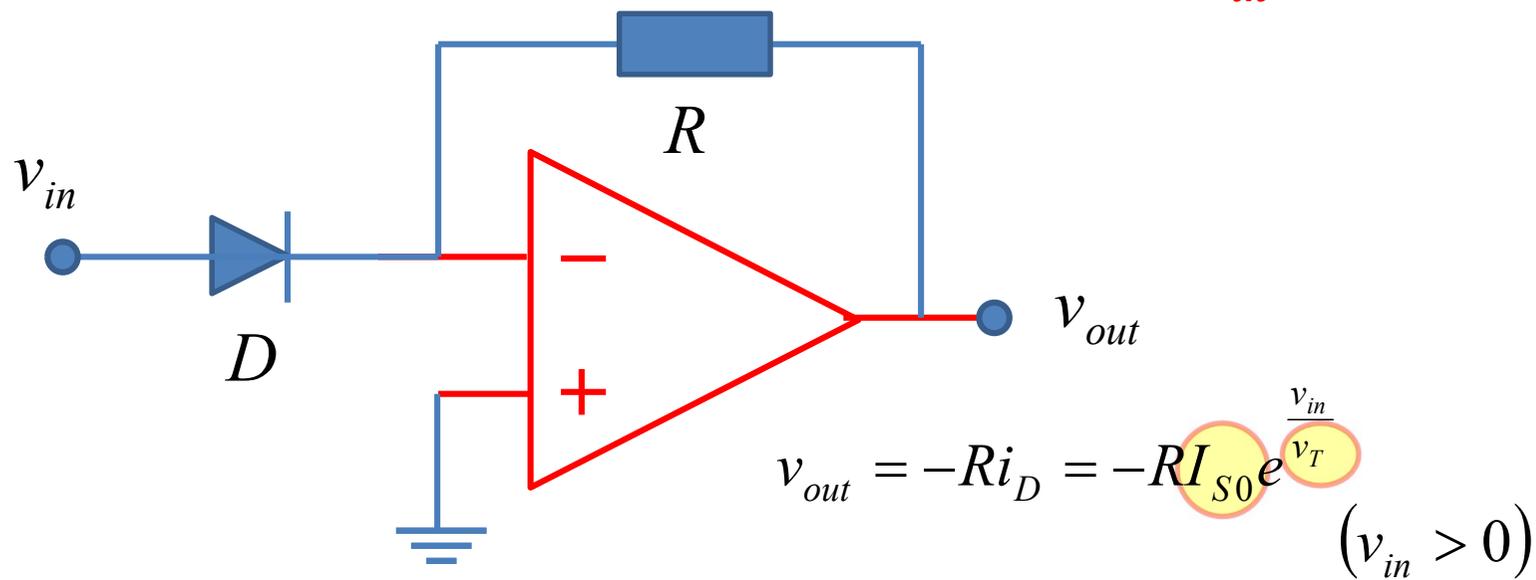
2.1

对数

指数运算

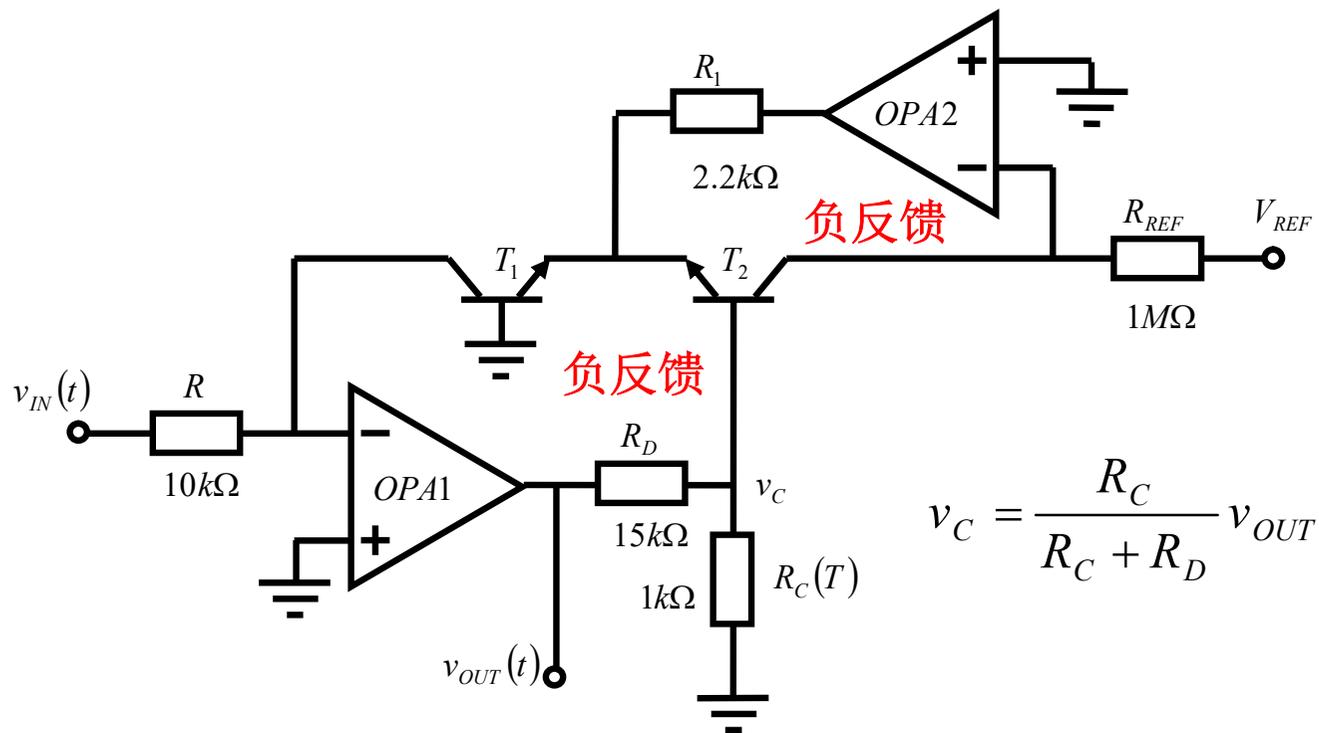


$v_{in} < 0?$



$v_{in} < 0?$

温度补偿



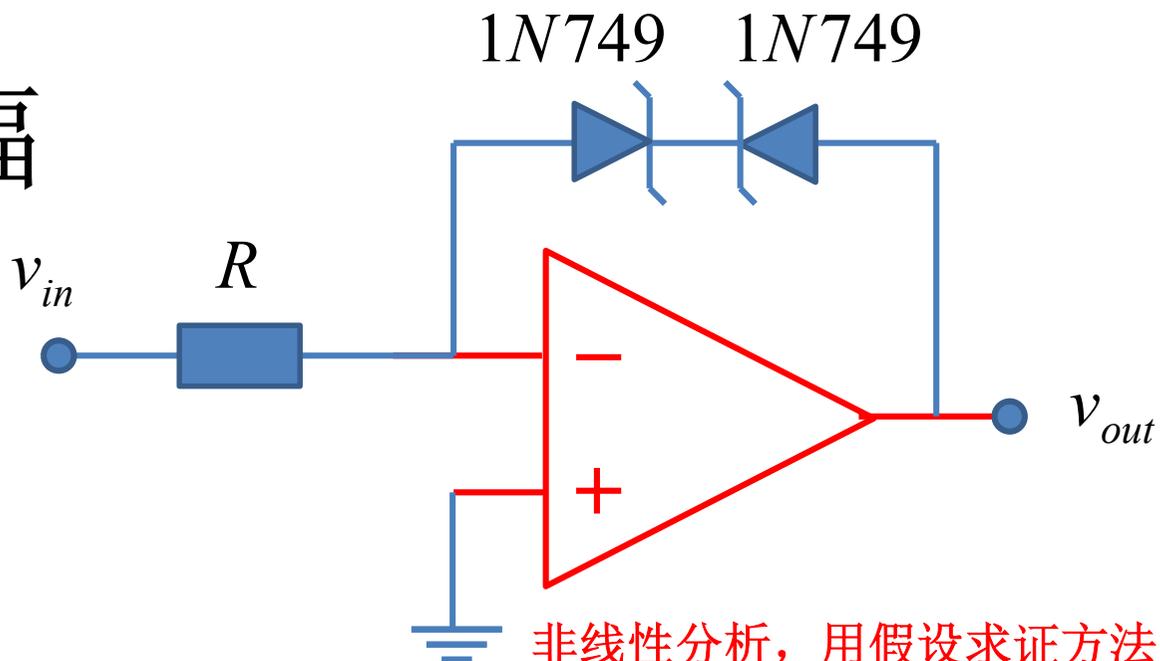
$$v_C = \frac{R_C}{R_C + R_D} v_{OUT}$$

$$v_C = V_{BE2} - V_{BE1} = v_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{CS0}} - v_T \ln \frac{I_{C1}}{I_{CS0}} = v_T \ln \frac{I_{C2}}{I_{C1}} \quad \text{消除 } I_{CS0} \text{ 影响}$$

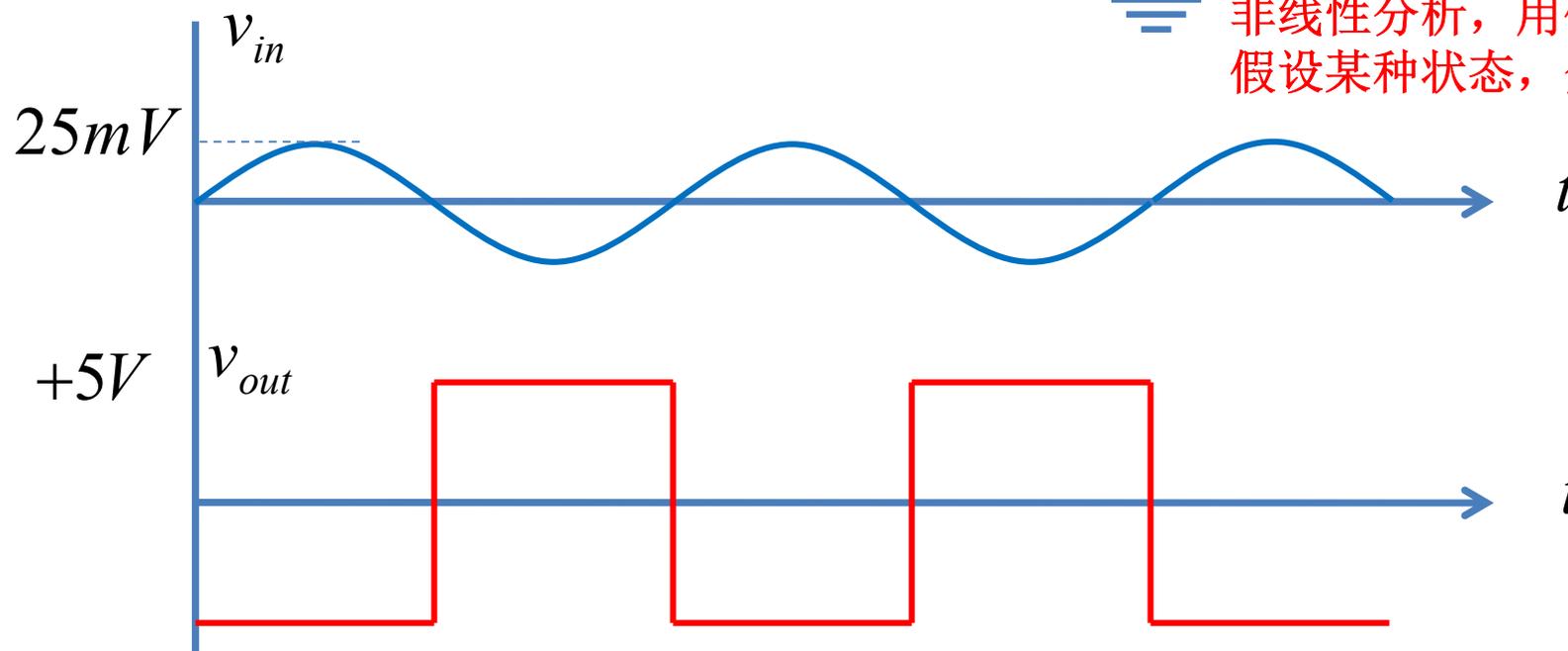
$$I_{C2} = \frac{V_{REF}}{R_{REF}} = I_{REF} \quad I_{C1} = \frac{v_{IN}}{R} = i_{IN}$$

$$v_{OUT} = \frac{R_C + R_D}{R_C} v_C = \frac{R_C + R_D}{R_C} v_T \ln \left(\frac{V_{REF}}{R_{REF}} \frac{R}{v_{IN}} \right) \approx -\frac{R_D}{R_C} v_T \ln \left(\frac{v_{IN}}{V_{REF}} \frac{R_{REF}}{R} \right)$$

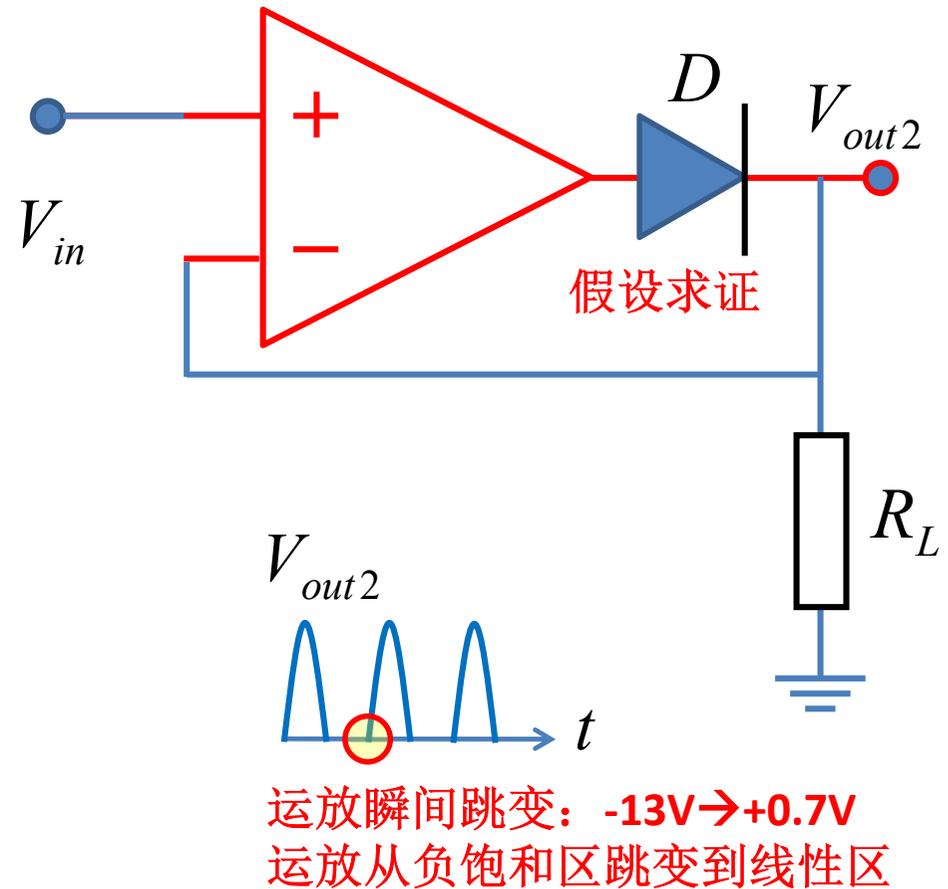
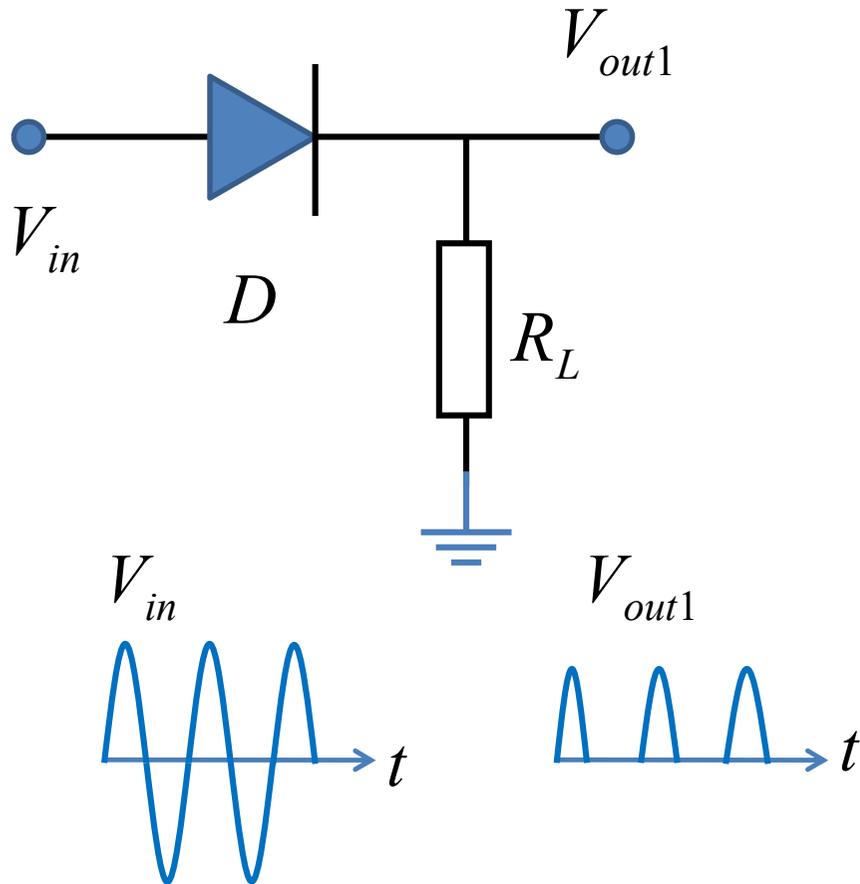
2.2 输出限幅



非线性分析，用假设求证方法
假设某种状态，分析确认

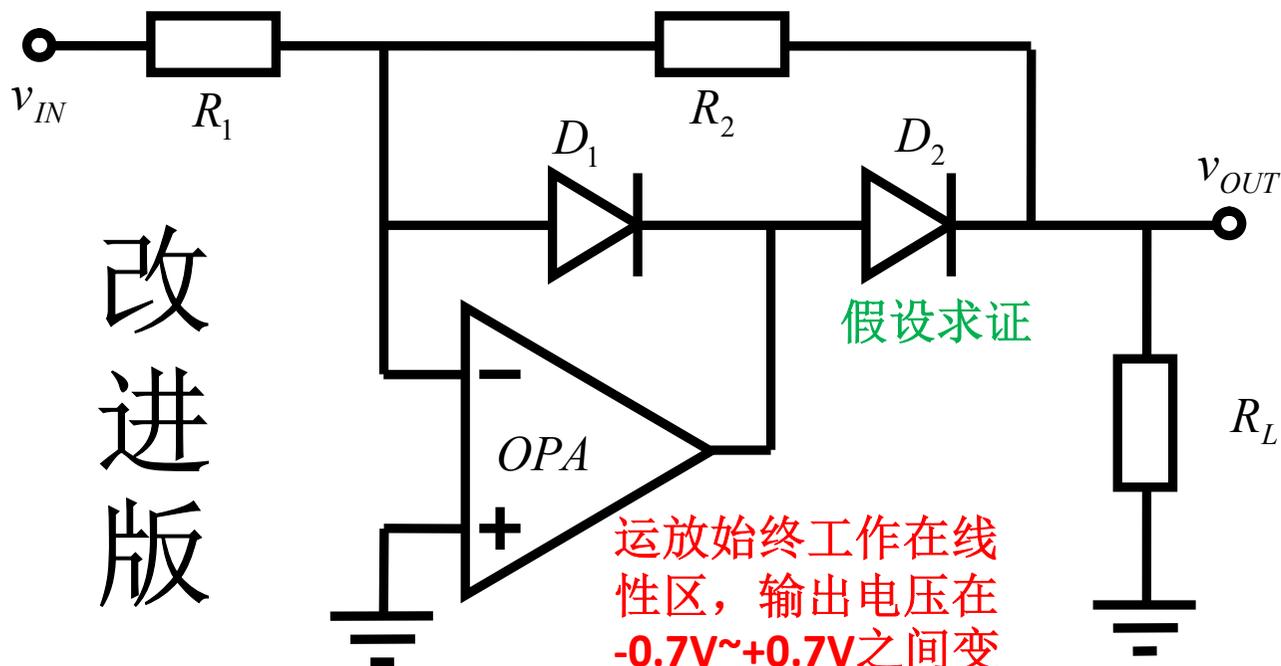


2.3 半波信号产生



- 思考：两种方法除了输出波形稍有差别之外，还有什么本质的差别？

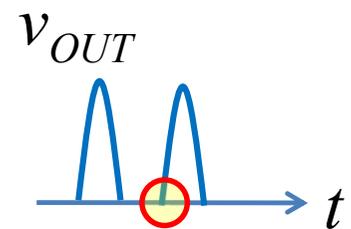
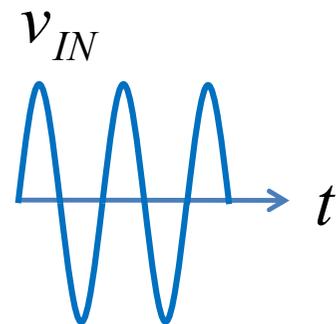
负反馈具有唯一解，假设成立则分析完成



改进版

假设求证

运放始终工作在线性区，输出电压在 $-0.7V \sim +0.7V$ 之间变动，反应速度快



运放瞬间跳变: $-0.7V \rightarrow +0.7V$

$$v_{IN} > 0$$

D_1 导通

$$v_{OUT} = 0$$

$$v_{OPA,O} = -0.7V$$

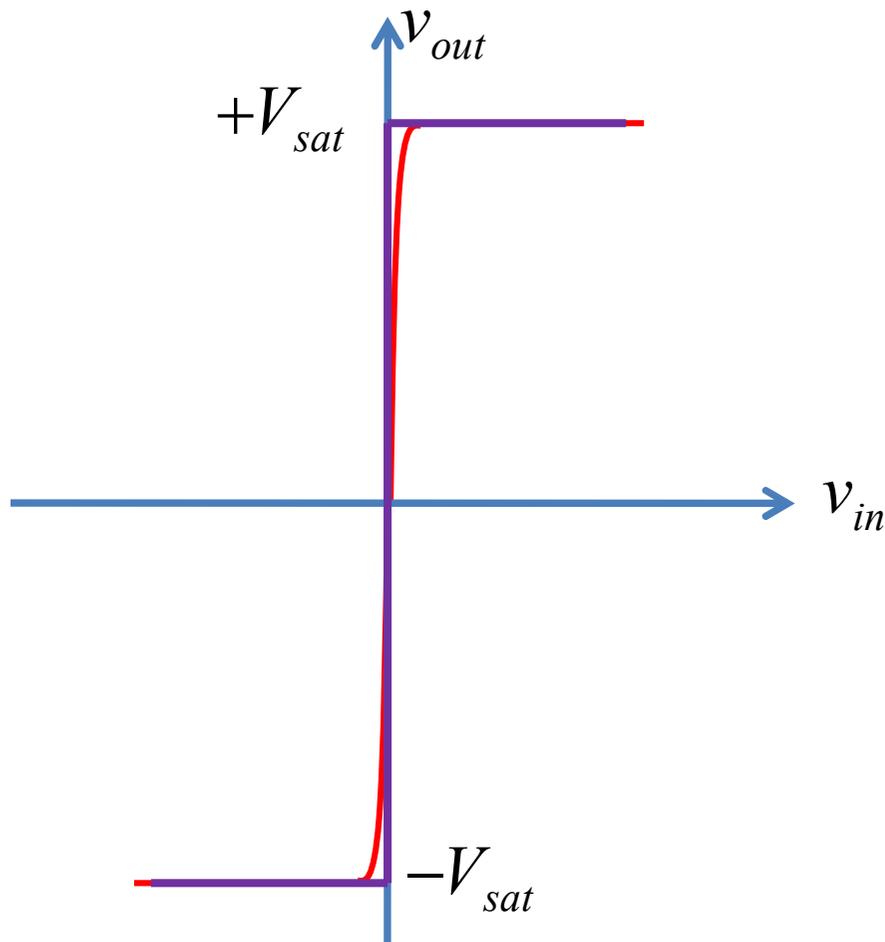
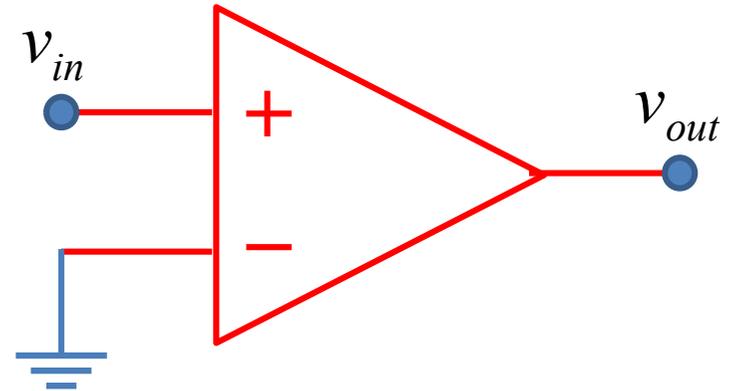
$$v_{IN} < 0$$

D_2 导通

$$v_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} v_{IN}$$

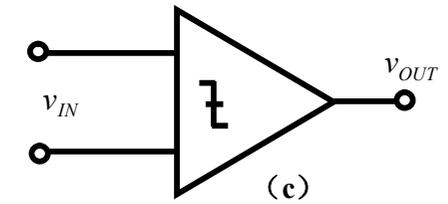
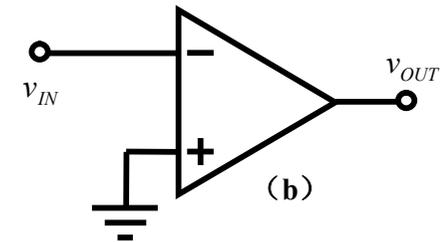
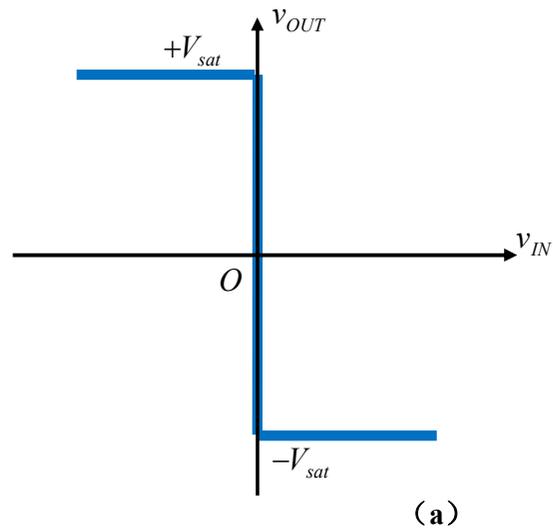
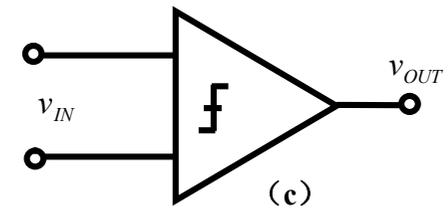
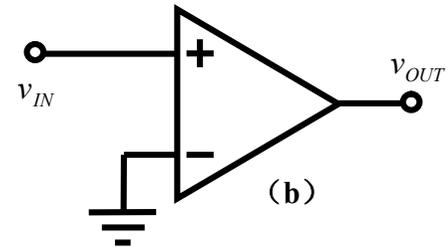
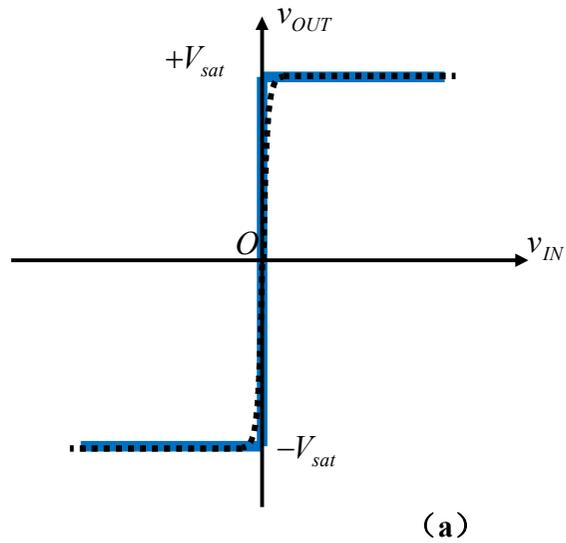
$$v_{OPA,O} = v_{OUT} + 0.7V$$

2.4 过零比较器 zero-crossing detector

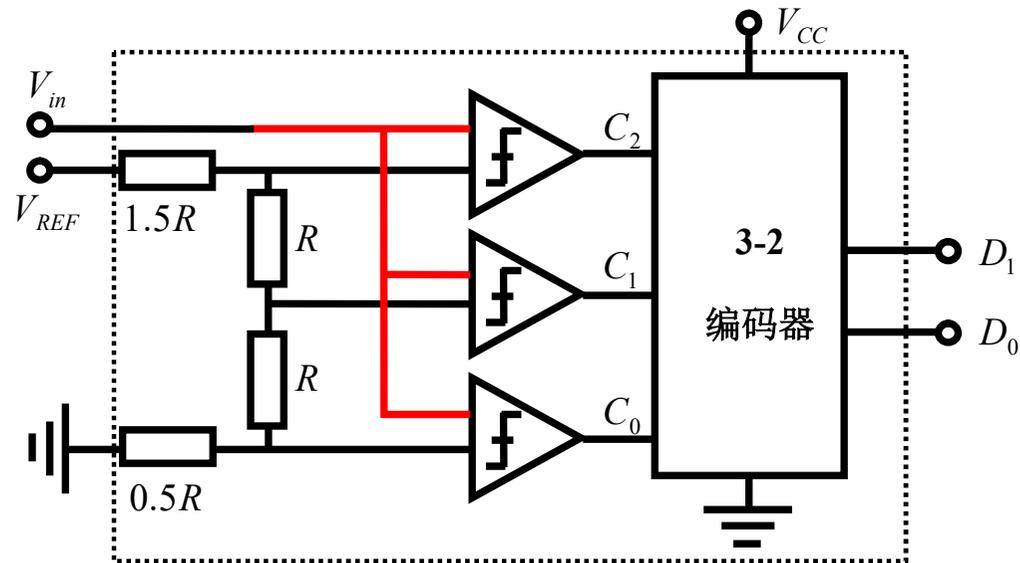


- 只要输入信号足够大，中间过渡区时间很短，可以忽略不计，于是可以极致化抽象为：
 - 当输入大于0，输出为 **+1** ($+V_{sat}$)
 - 当输入小于0，输出为 **-1** ($-V_{sat}$)

比较器符号



比较器应用1: Flash ADC



模拟输入电压	$C_2C_1C_0$	数字输出码 D_1D_0
?	000	00
...

作业4: 画出 $V_{in}-D_{out}$ 的转移特性曲线

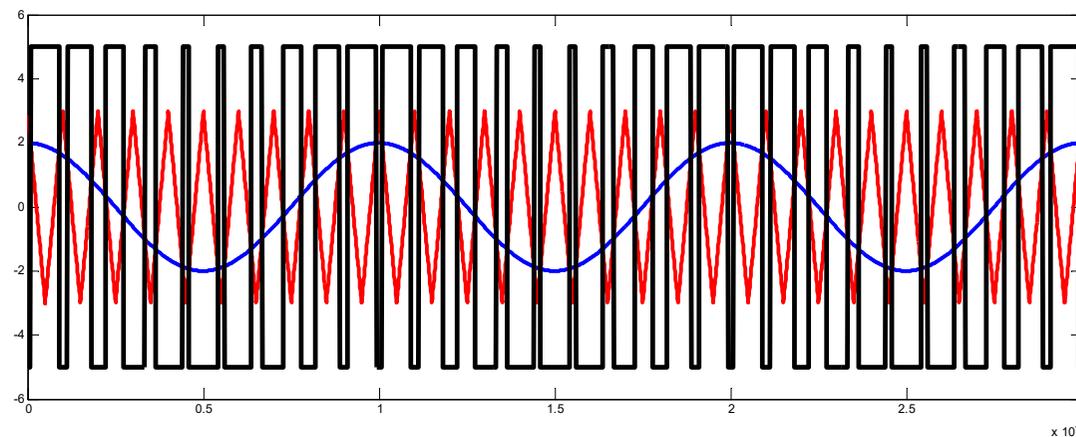
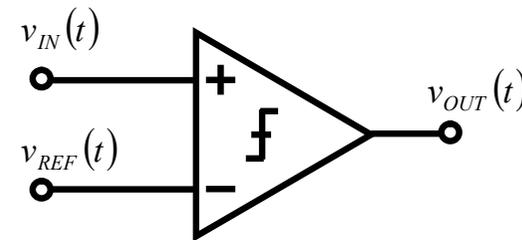
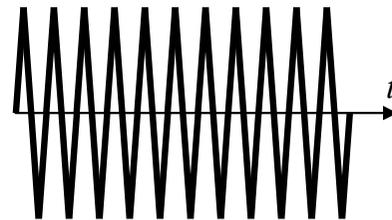
比较器应用2：脉冲宽度调制

PWM: Pulse Width Modulation

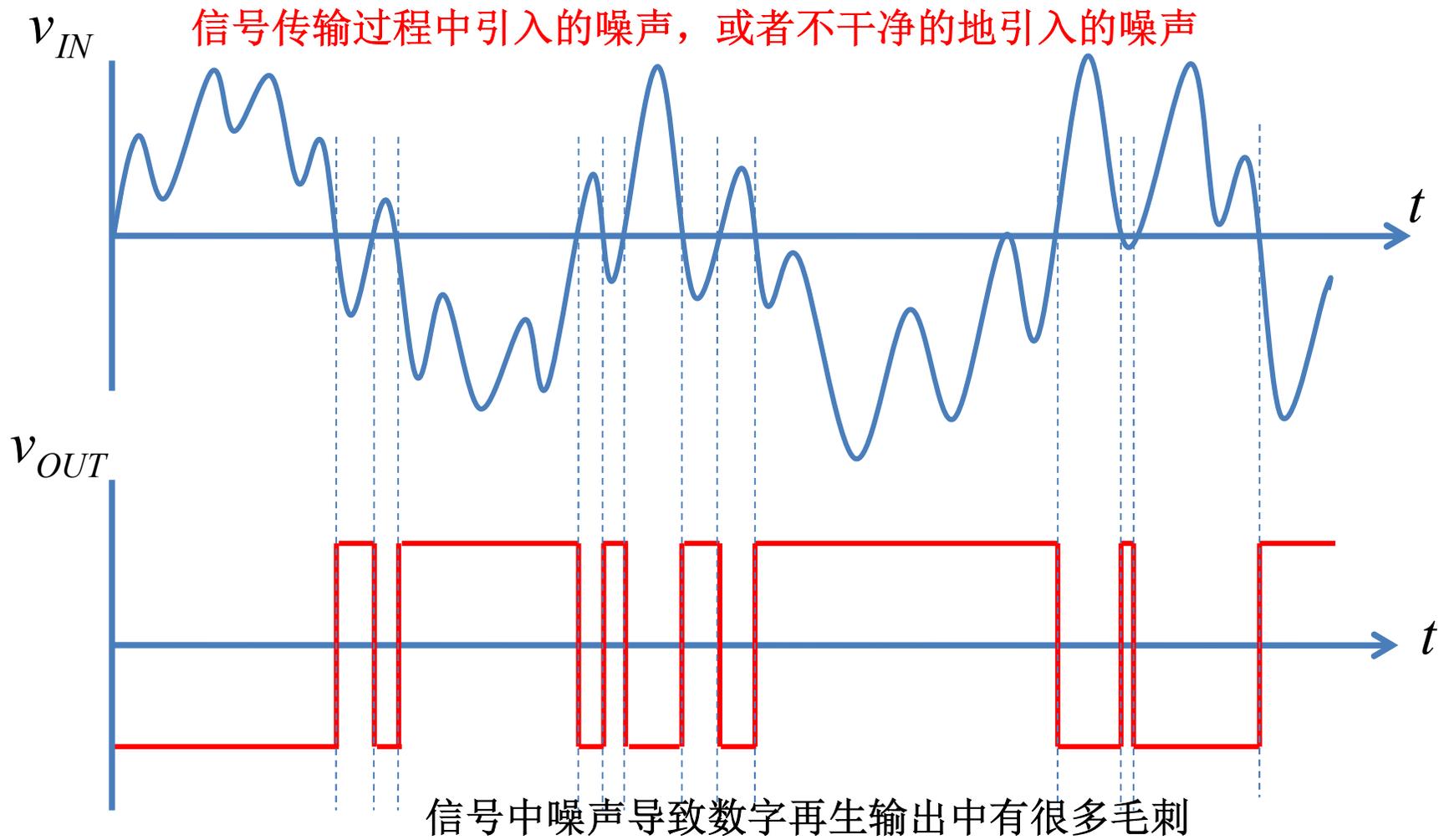
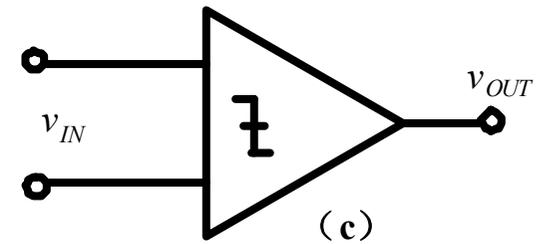
低频基带信号



高频三角波信号

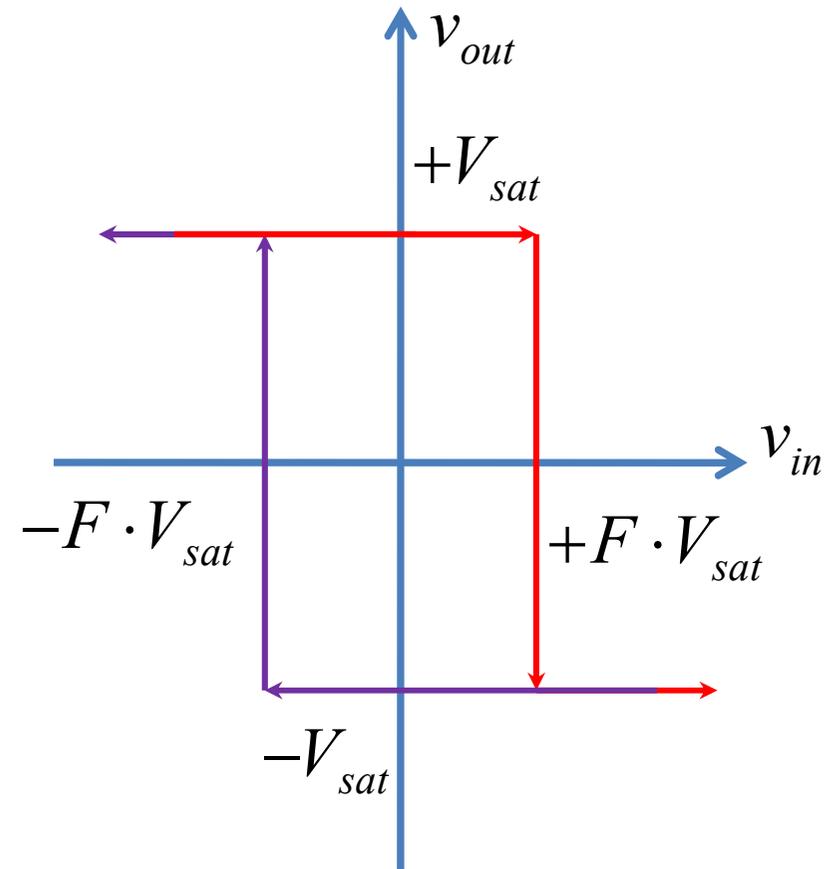
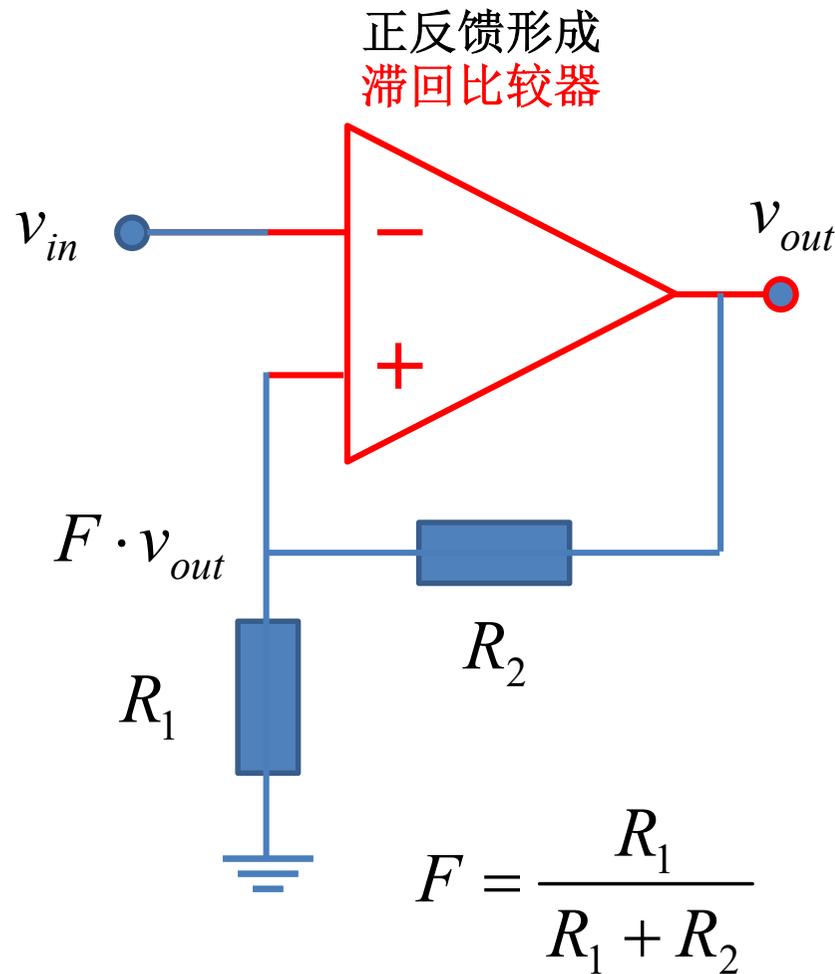


过零比较器的噪声问题



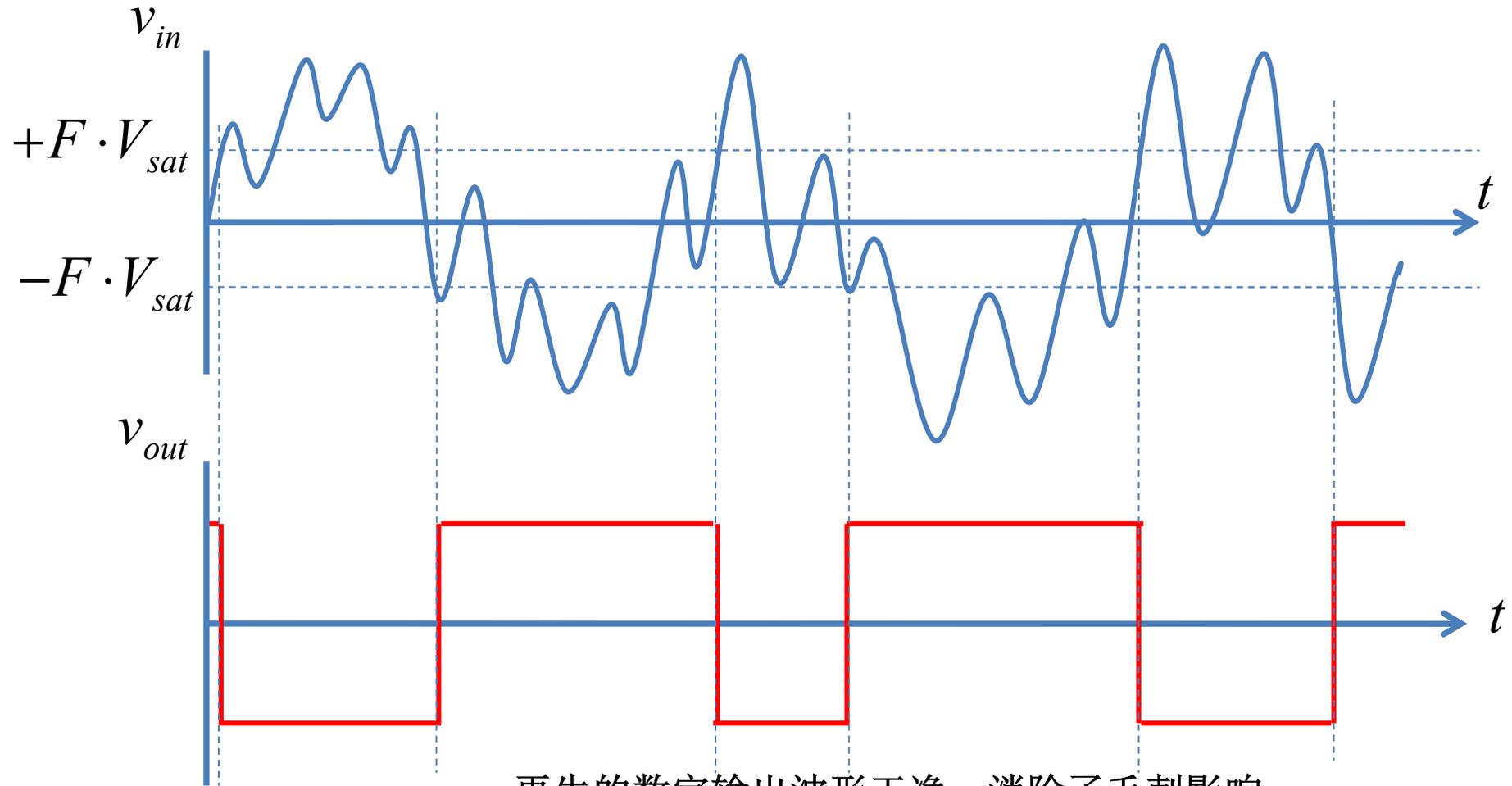
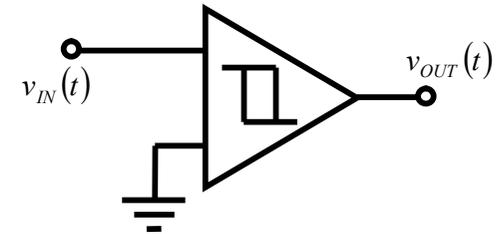
2.5 施密特触发器

Schmitt Trigger



Hysteresis: 滞回现象
具有记忆功能

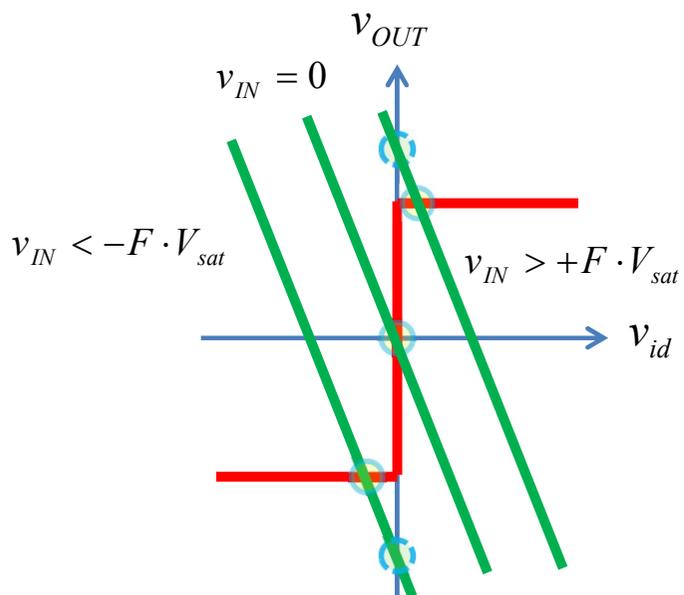
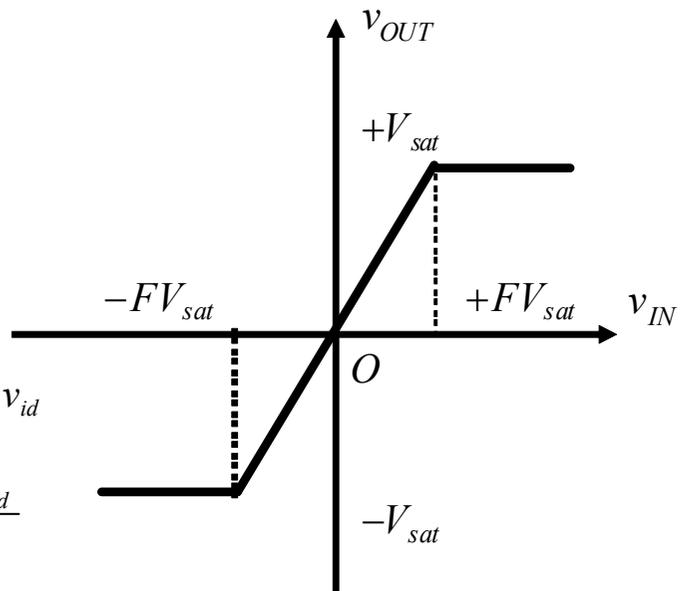
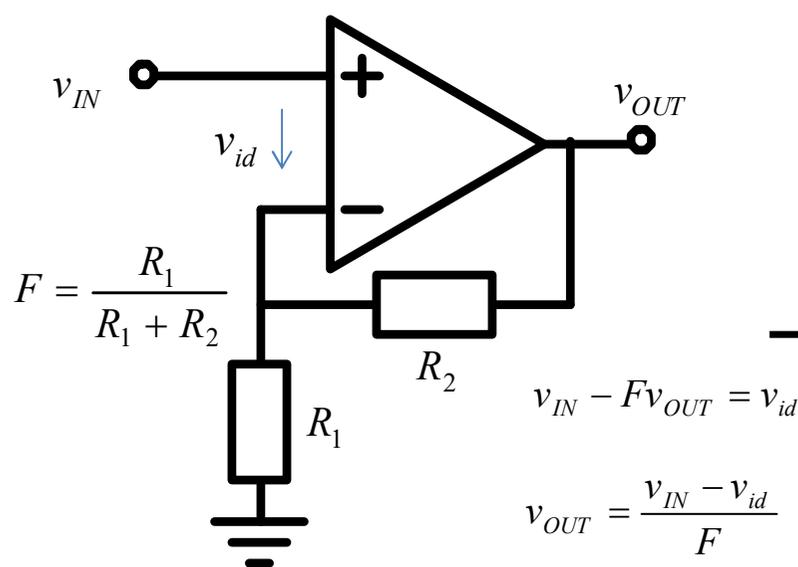
用施密特触发器消除毛刺



再生的数字输出波形干净，消除了毛刺影响

线性负反馈 唯一输出

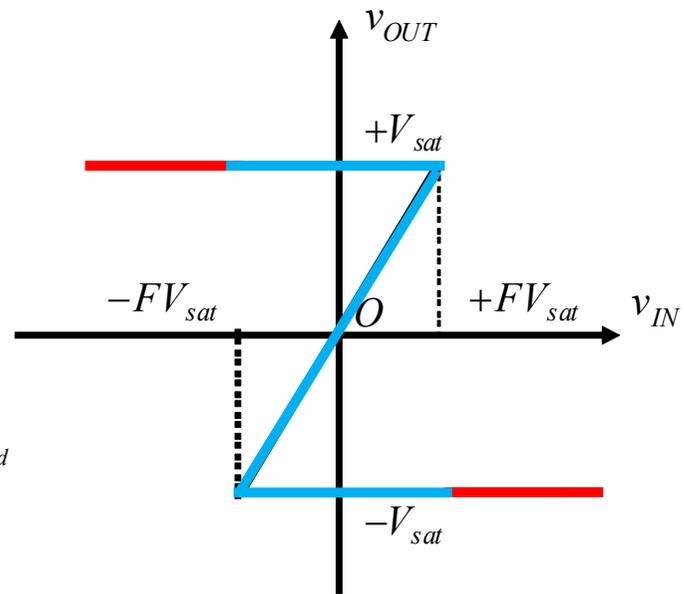
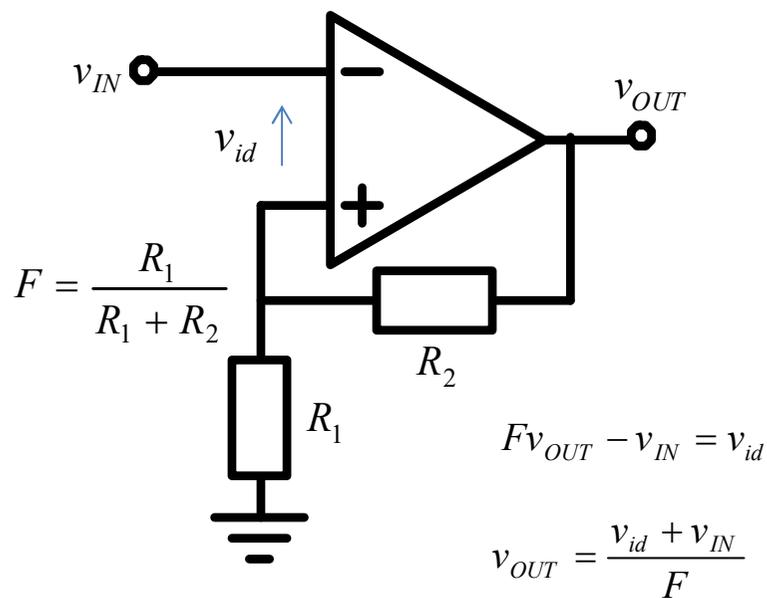
线性正反馈与线性负反馈的区别



线性区 $v_{IN} = F \cdot v_{OUT}$

$$v_{OUT} = \frac{1}{F} v_{IN} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{IN}$$

线性正反馈



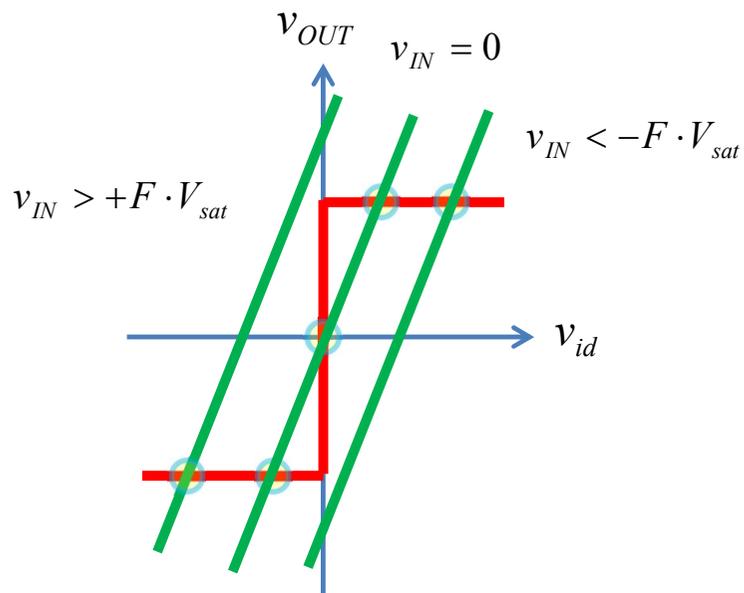
线性区 $v_{IN} = F \cdot v_{OUT}$

$$v_{OUT} = \frac{1}{F} v_{IN} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_{IN}$$

不稳定区：待不住

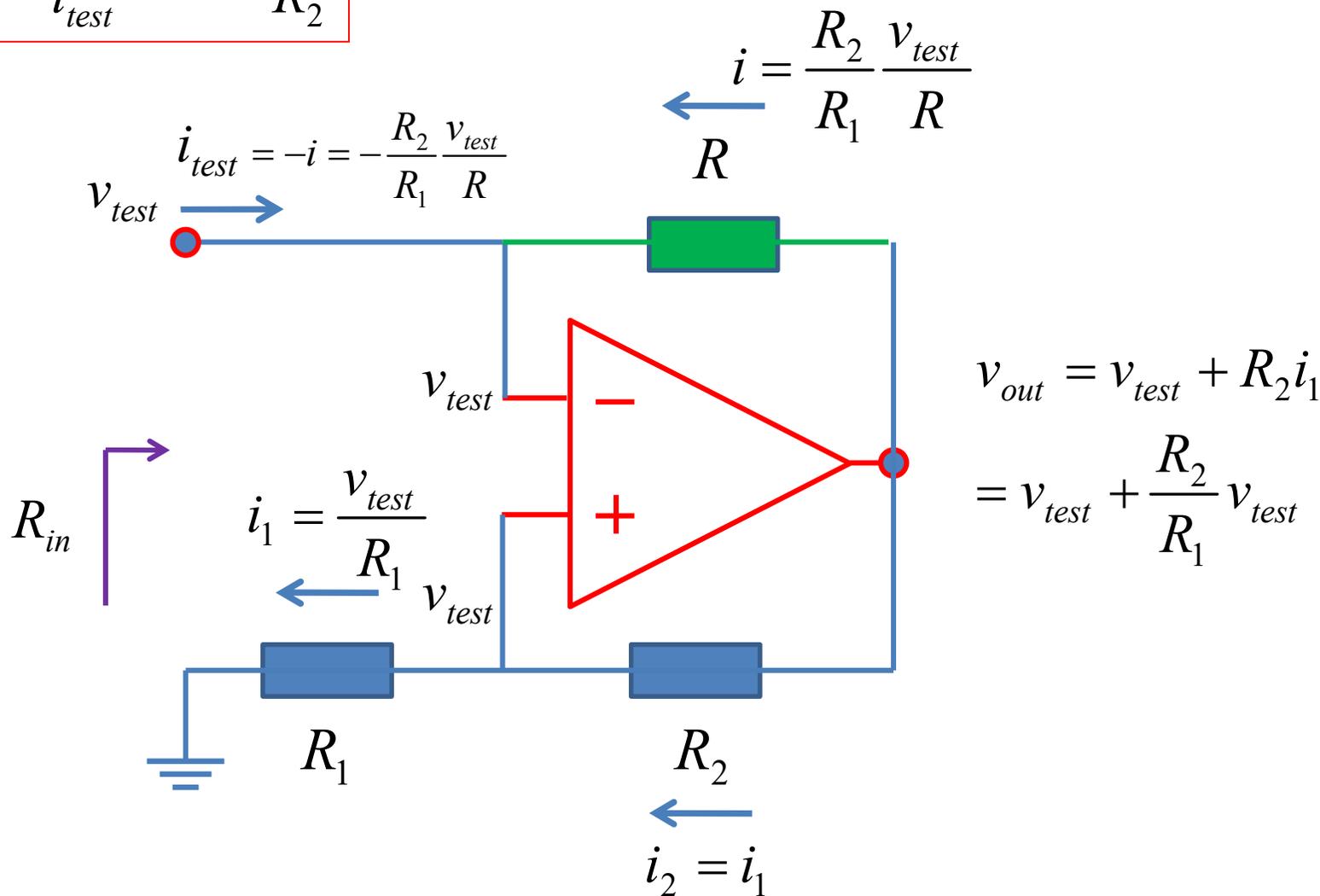
理论转移特性曲线
实际转移特性曲线：滞回曲线

非唯一输出

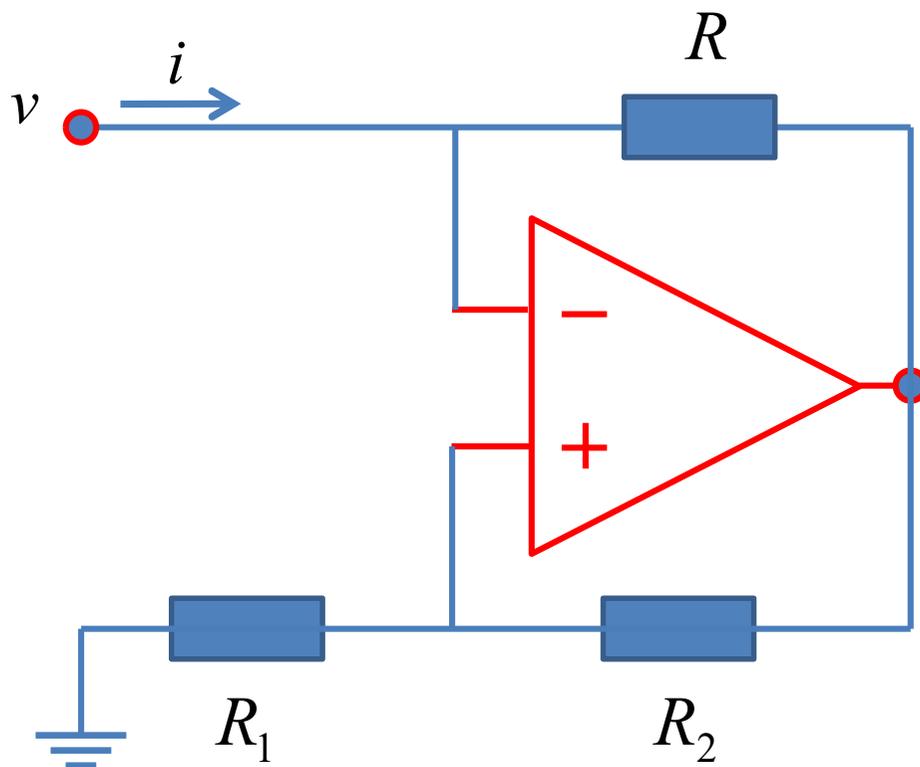


负反馈令其工作点可以待在线性区
 线性区正反馈可等效为线性负阻

$$R_{in} = \frac{v_{test}}{i_{test}} = -R \frac{R_1}{R_2}$$

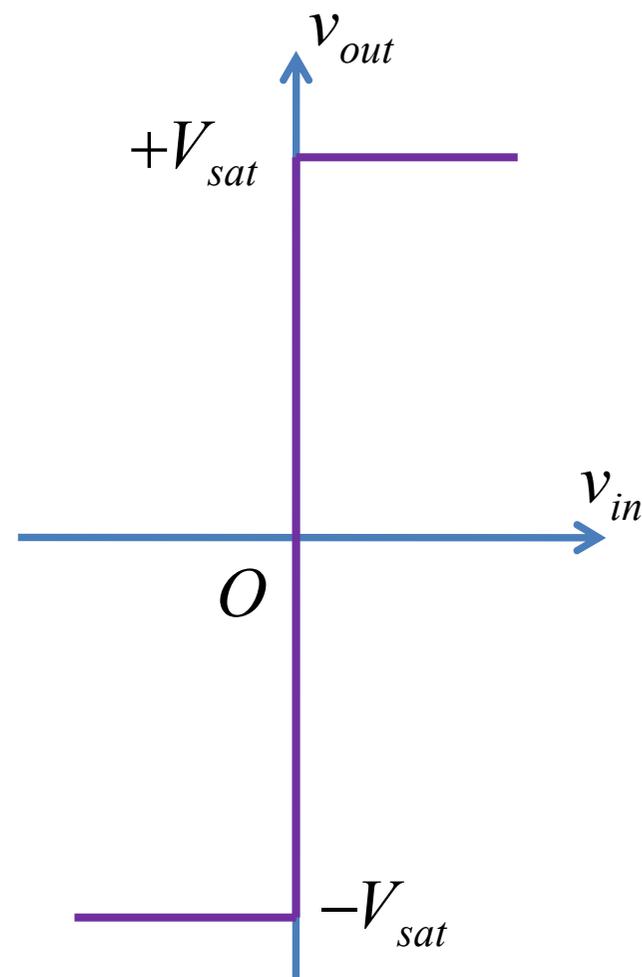


- 已知理想运放的转移特性，分析确认如图所示单端口网络的伏安特性为S型负阻
 - 提示1: 假设在线性区，假设在正饱和区，假设在负饱和区
 - 提示2: 电流源驱动，S型具有唯一解
 - 电流源驱动确保负反馈大于正反馈



作业1

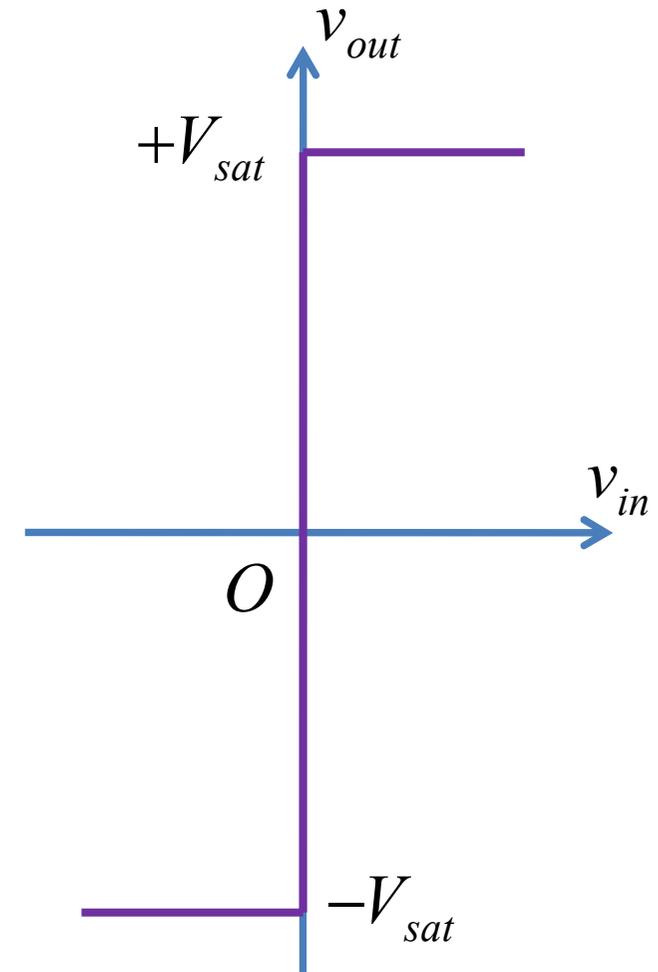
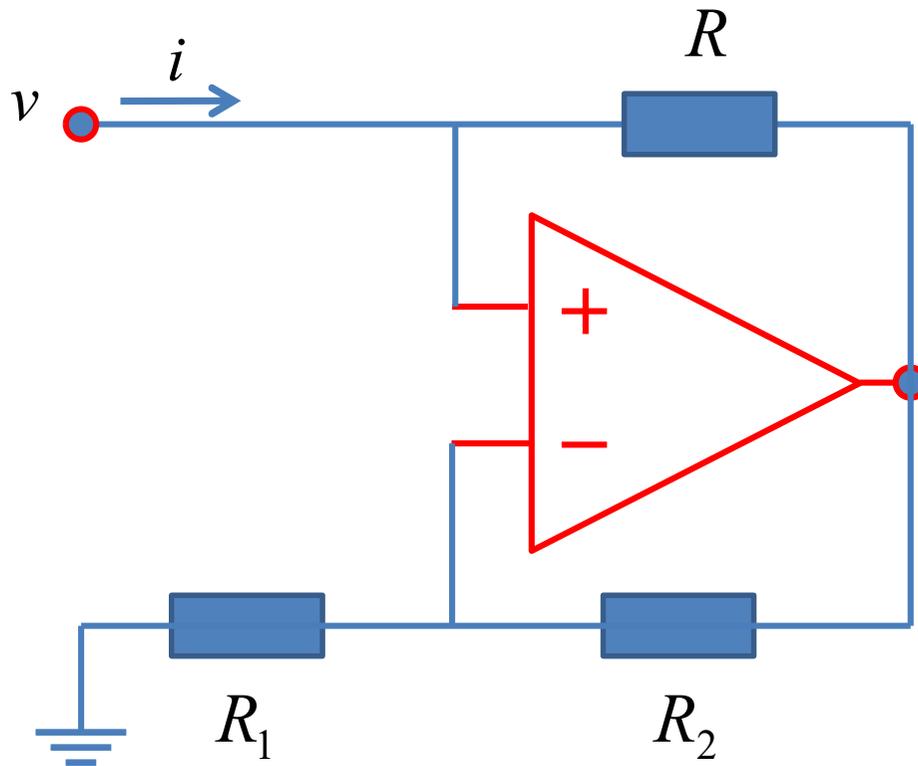
S型负阻



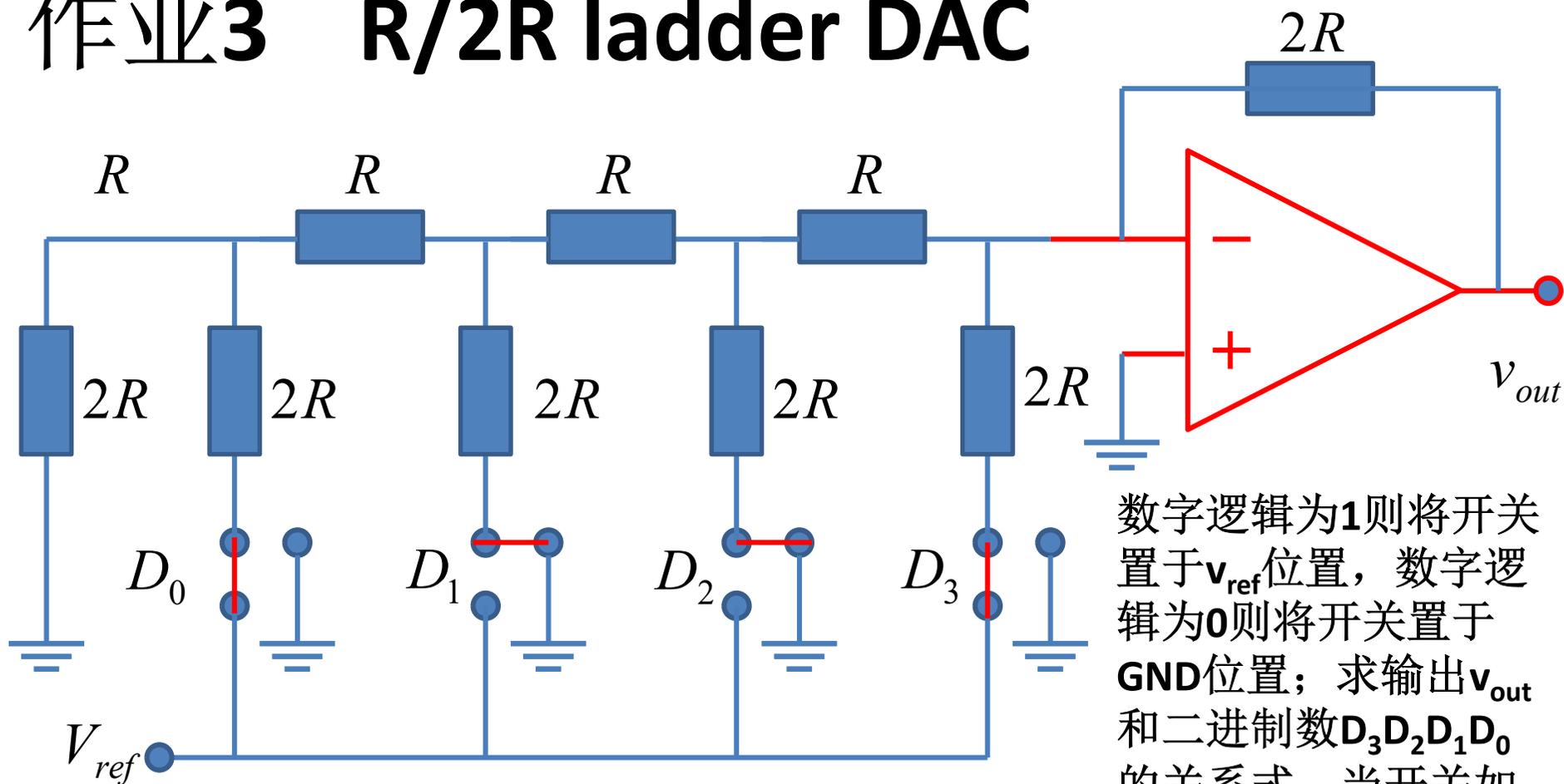
作业2

N型负阻

- 已知理想运放的转移特性，分析确认如图所示单端口网络的伏安特性为N型负阻
 - 提示1: 假设在线性区，假设在正饱和区，假设在负饱和区
 - 提示2: 电压源驱动，N型具有唯一解
 - 电压源驱动，确保负反馈



作业3 R/2R ladder DAC



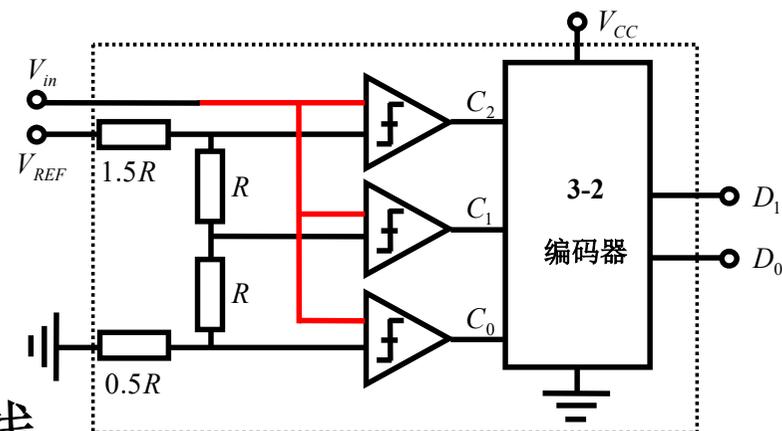
将 D_0 - D_3 处理为电压源, ...

数字逻辑为**1**则将开关置于 v_{ref} 位置, 数字逻辑为**0**则将开关置于GND位置; 求输出 v_{out} 和二进制数 $D_3D_2D_1D_0$ 的关系式。当开关如图所示时, 二进制数是多少? 对应输出电压为多少? 假设 $v_{ref}=5V$ 。

作业4

Flash-ADC编码表

- 填写flash-ADC编码的码表
- 画出输入 V_{in} 输出 D_{out} 转移特性曲线



模拟输入电压	$C_2C_1C_0$	数字输出码 D_1D_0
	000	00
		01
		10
		11

作业5 CMRR

- 假设运放理想，证明：
- 回答：要想获得80dB的CMRR，对外部电阻精度提出什么要求？

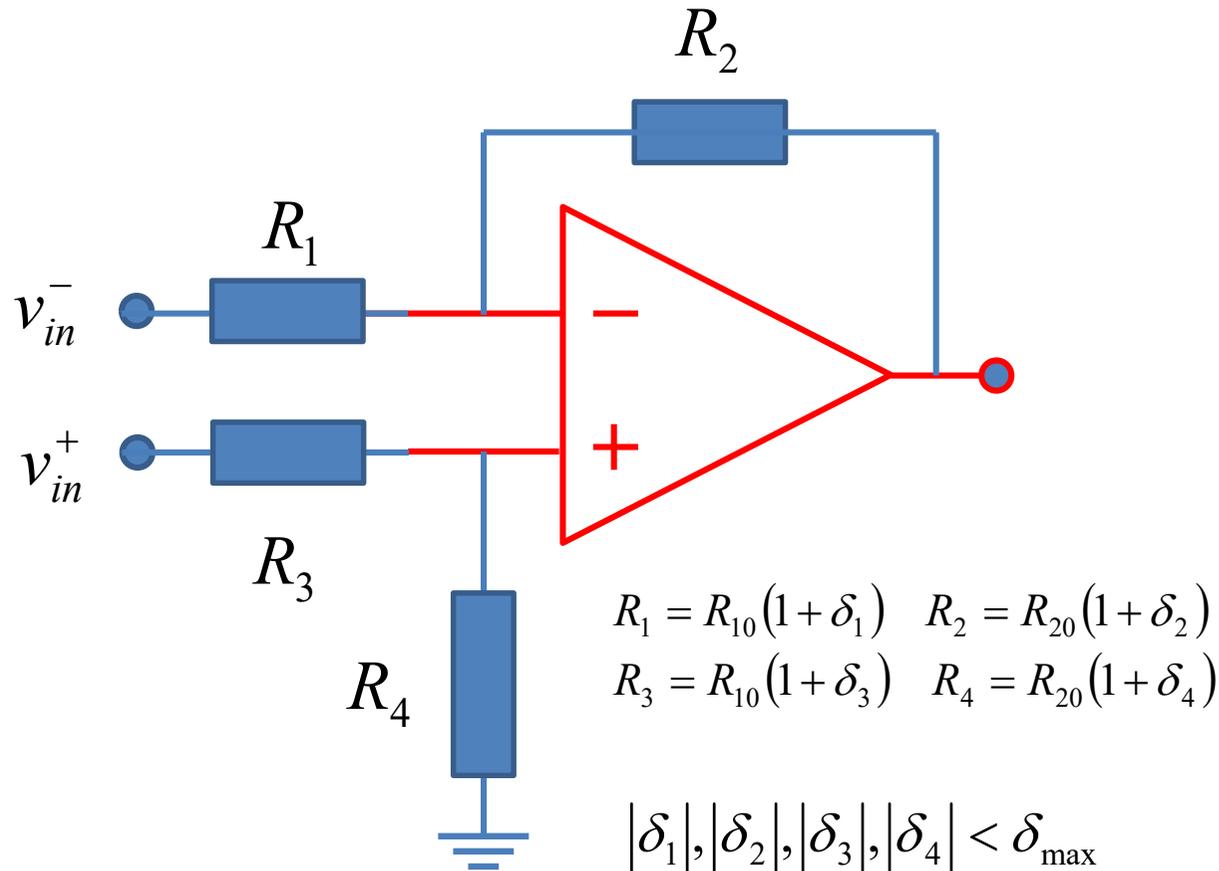
$$CMRR_{\min} = \frac{1}{4\delta_{\max}}$$

$$v_{in}^+ = v_c + 0.5v_d$$

$$v_{in}^- = v_c - 0.5v_d$$

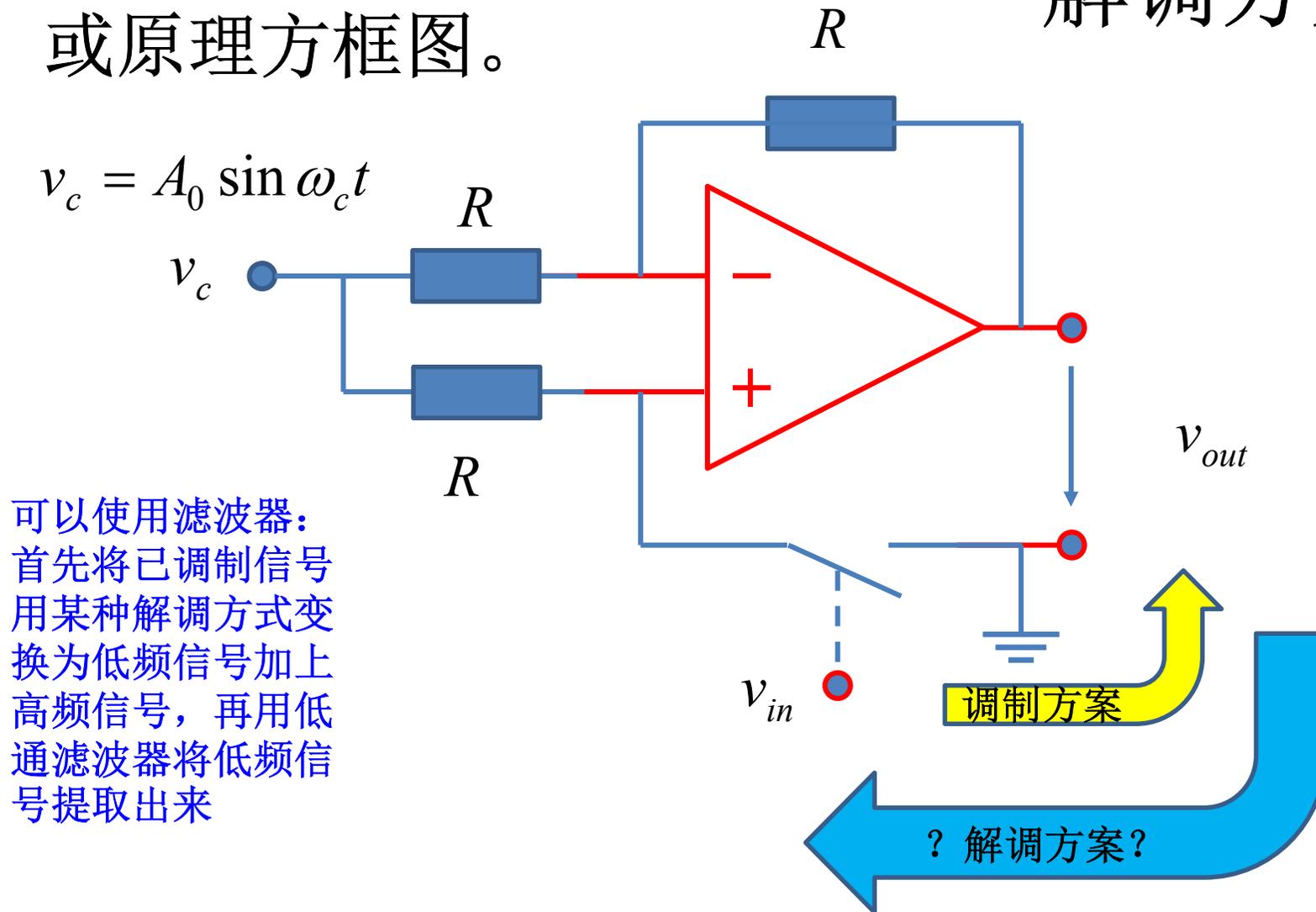
$$v_{out} = A_{vd}v_d + A_{vc}v_c$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right|$$



作业6 解调方案

- 给出你的解调方案，画出电路图或原理方框图。



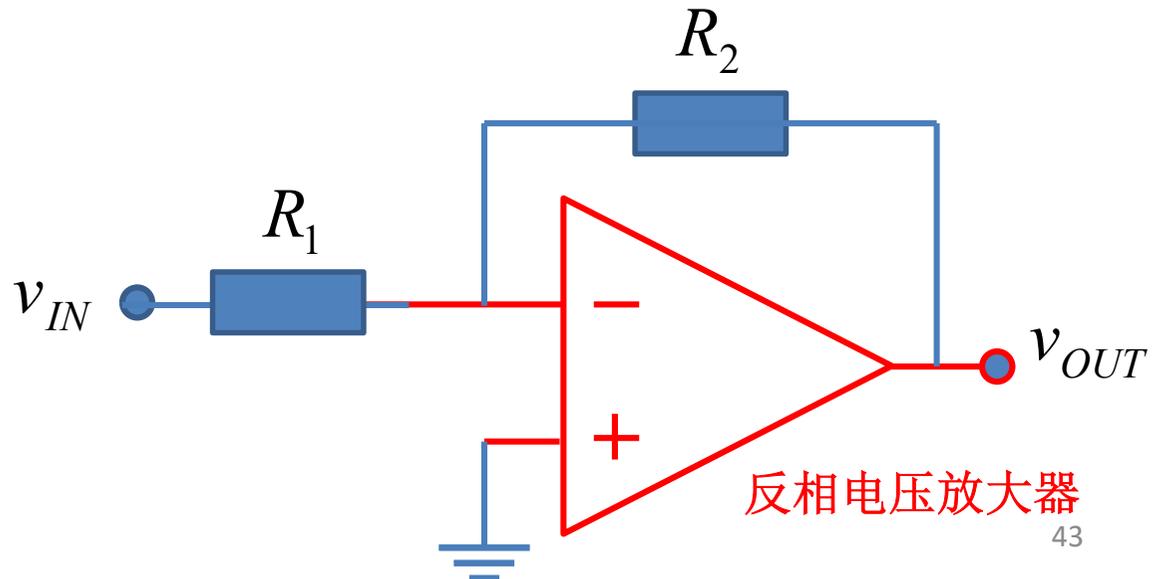
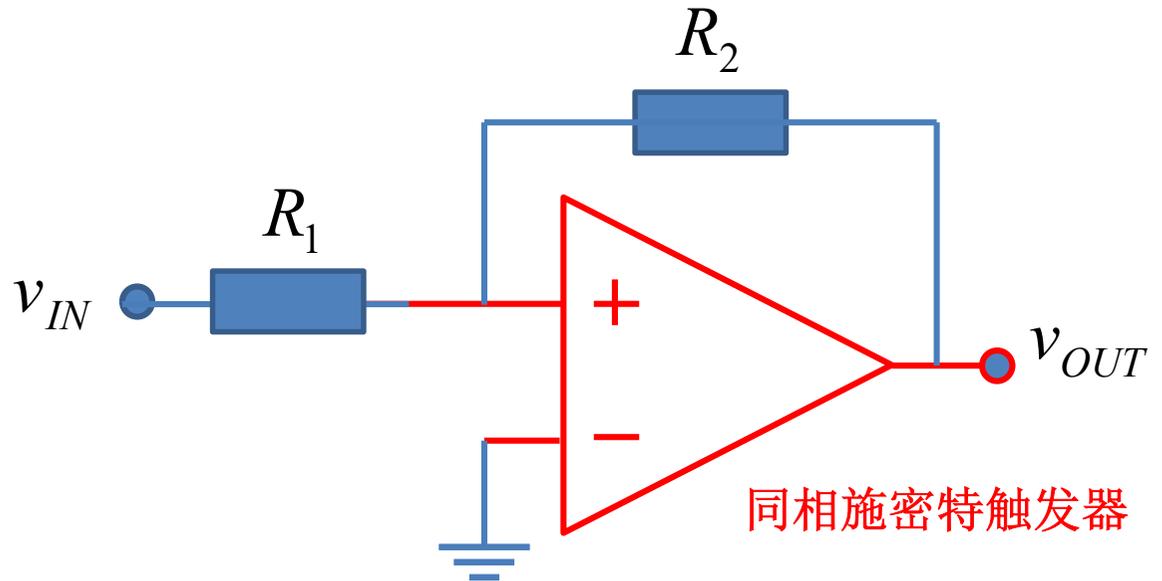
作业7 同相施密特触发器

- 分析并画出如下滞回比较器的输入输出转移特性曲线（滞回曲线分析）

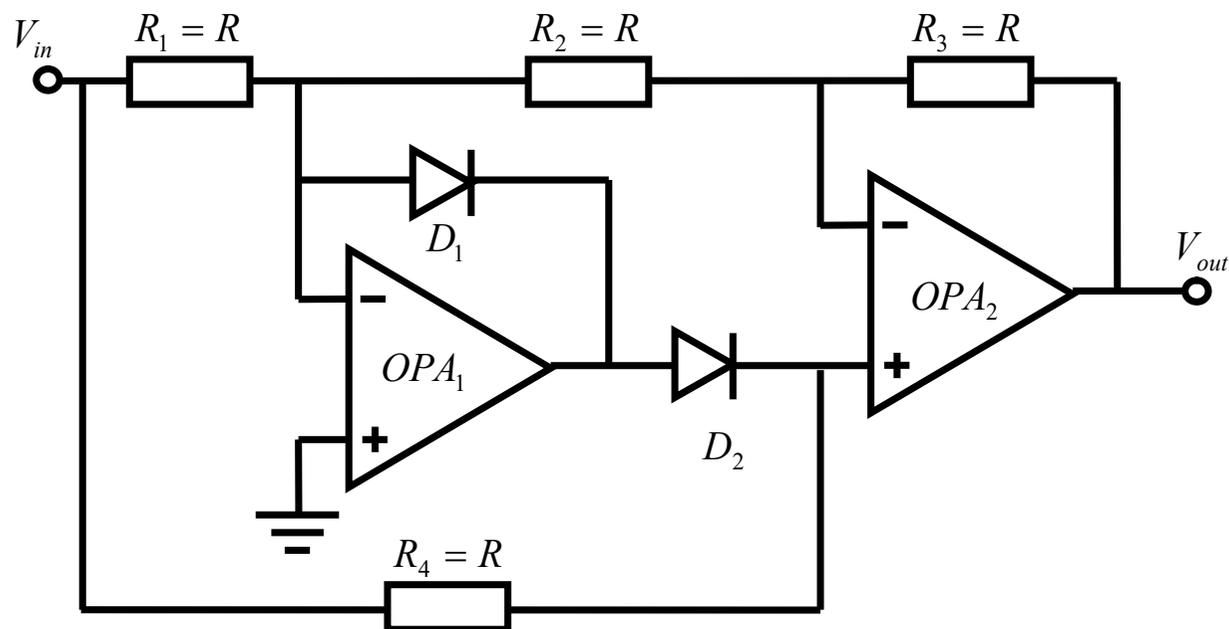
- 和课堂上讲述的反相施密特触发器的滞回曲线比较，两者差别在哪里？

- 用图解法分析其转移特性曲线和反相电压放大器的区别

- 课堂上讨论了反相施密特触发器与同相电压放大器的图解法



作业8 双运放非线性应用



- 分析这个双运放二极管电路实现了什么电路功能？
 - 画出输入输出转移特性曲线
 - 如果输入为正弦波，输出为什么波形？

CAD: 理论/仿真分析

