

第三章 运算放大器的非线性应用

——3.1 波形整形电路

李泳佳

东南大学电子系国家ASIC工程中心

yongjia.li@outlook.com





3.1 波形整形电路

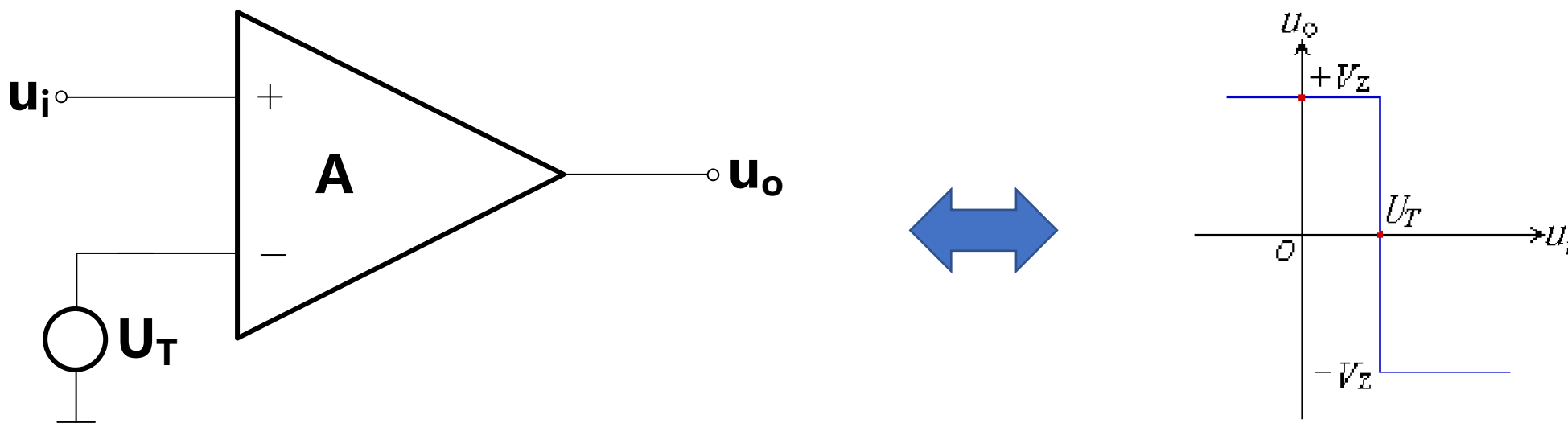
本节内容

3.1.1 电压比较器

3.1.2 施密特比较器

3.1.1 电压比较器

- ✓ **功能**：将一个模拟电压信号与一个**参考电压**相比较，输出一定的高低电平
- ✓ **特性**：非线性开关特性（高低电平）
- ✓ **参考电压 U_T** ：使输出电压发生跳变时的**阈值电压（Threshold）**，**门限电压**



3.1.1 电压比较器

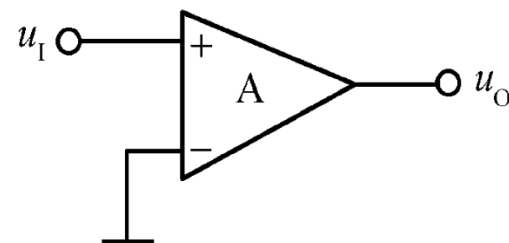
✓ **基本比较器**：运放开环工作，输出饱和电压 $\pm U_{OPP}$

- **线性区**：

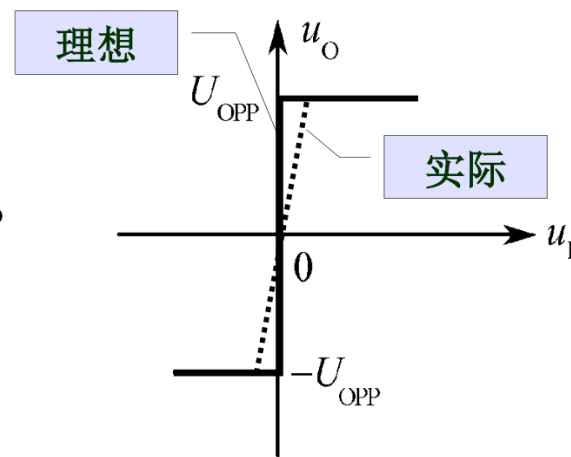
$$U_o = A_{od}(U_+ - U_-)$$

- **非线性区**（输出饱和）：

$$U_o = \begin{cases} +U_{OPP} & , U_+ > U_- \\ -U_{OPP} & , U_+ < U_- \end{cases}$$



(a) 电路



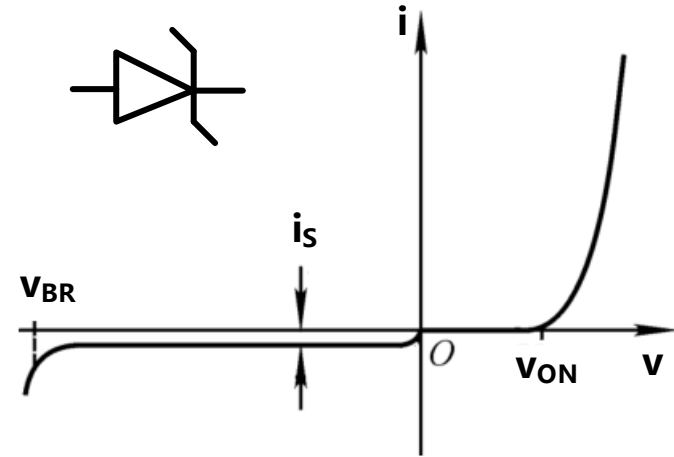
(b) 传输特性

✓ 开环工作时无稳定性问题，实际应用无补偿电容

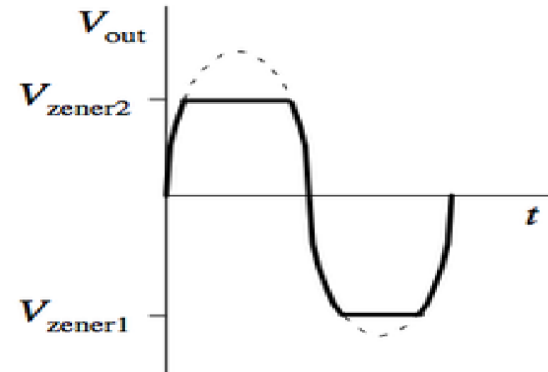
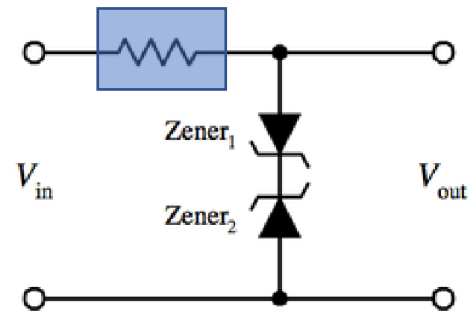
3.1.1 电压比较器

✓ 串联型比较器（开环）：

- 齐纳二极管：

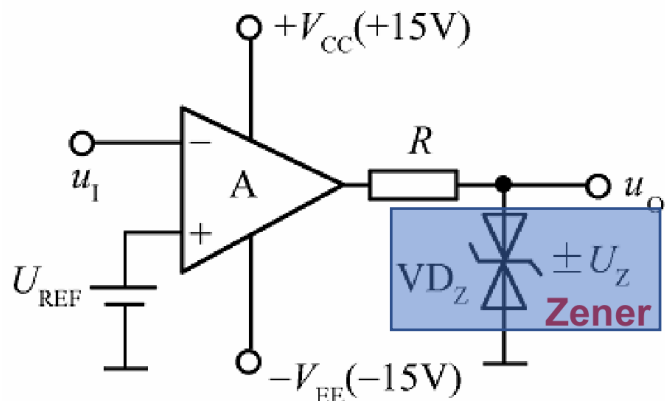


- 限幅电路：

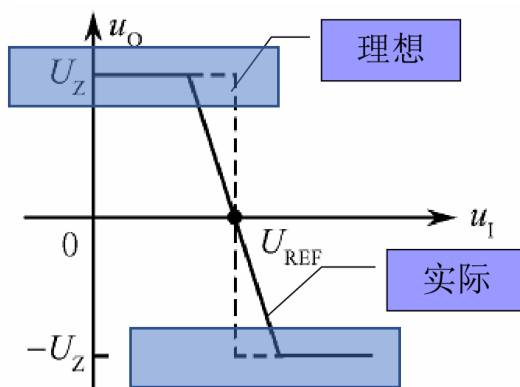


3.1.1 电压比较器

✓ 串联型比较器（开环）：



(a) 串联型比较器



(b) 串联型比较器电压传输特性

✓ 串联型比较器缺点：

- 放大器输出深度饱和
- 输出翻转，对寄生电容充放电，使转换速度受限制

$$(1) \quad u_i < U_{REF} \Rightarrow u_- < u_+ \therefore u_o = +U_Z$$

$$(2) \quad u_i > U_{REF} \Rightarrow u_- > u_+ \therefore u_o = -U_Z$$

3.1.1 电压比较器

✓ 并联型比较器（闭环负反馈）：

- 小信号线性叠加：

$$U_- = u_I \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{REF} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

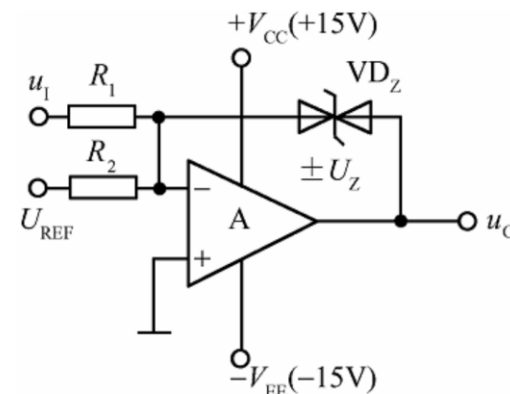


$$U_- = U_+ = 0 \Rightarrow u_I = -\frac{R_1}{R_2} U_{REF}$$

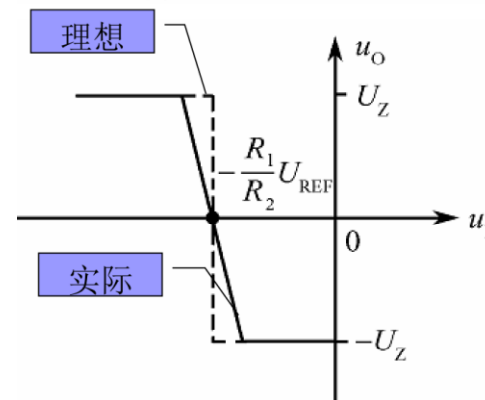


- 大信号钳位： $\pm U_Z$

✓ 优点：放大器输出不饱和，状态转换快



(c) 并联型比较器



(d) 并联型比较器电压传输特性

3.1.1 电压比较器

✓ 窗口比较器:

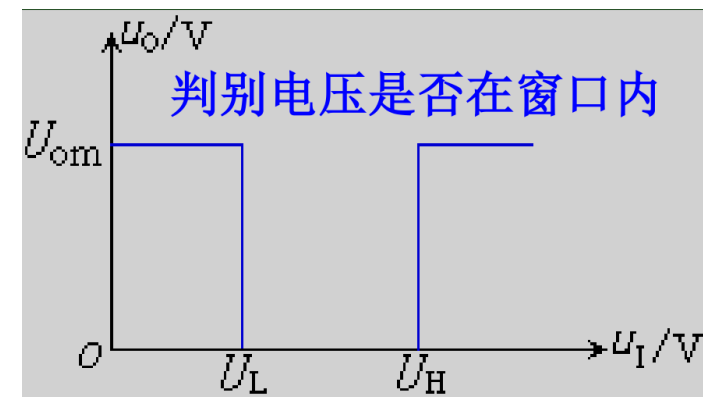
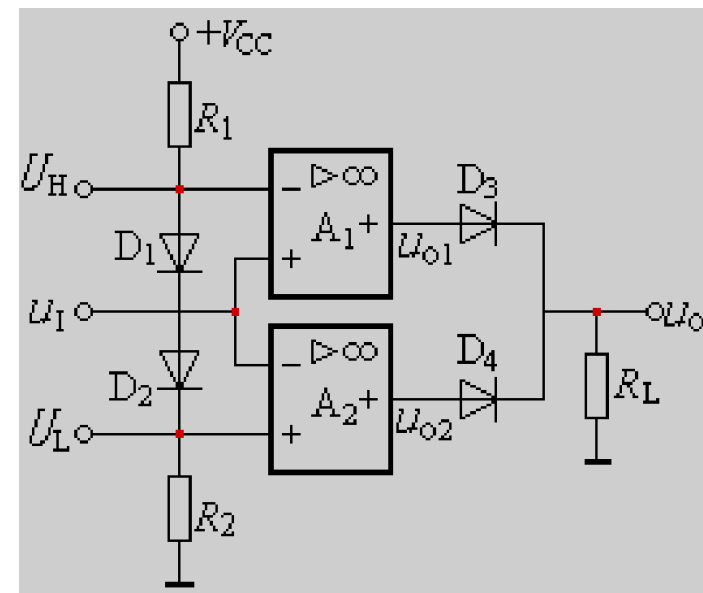
- 两个参考电压：电源到地的电阻与二极管串联

$$U_L = (V_{CC} - 2U_D) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{1}{2}(V_{CC} - 2U_D)$$

$$U_H = U_L + 2U_D$$

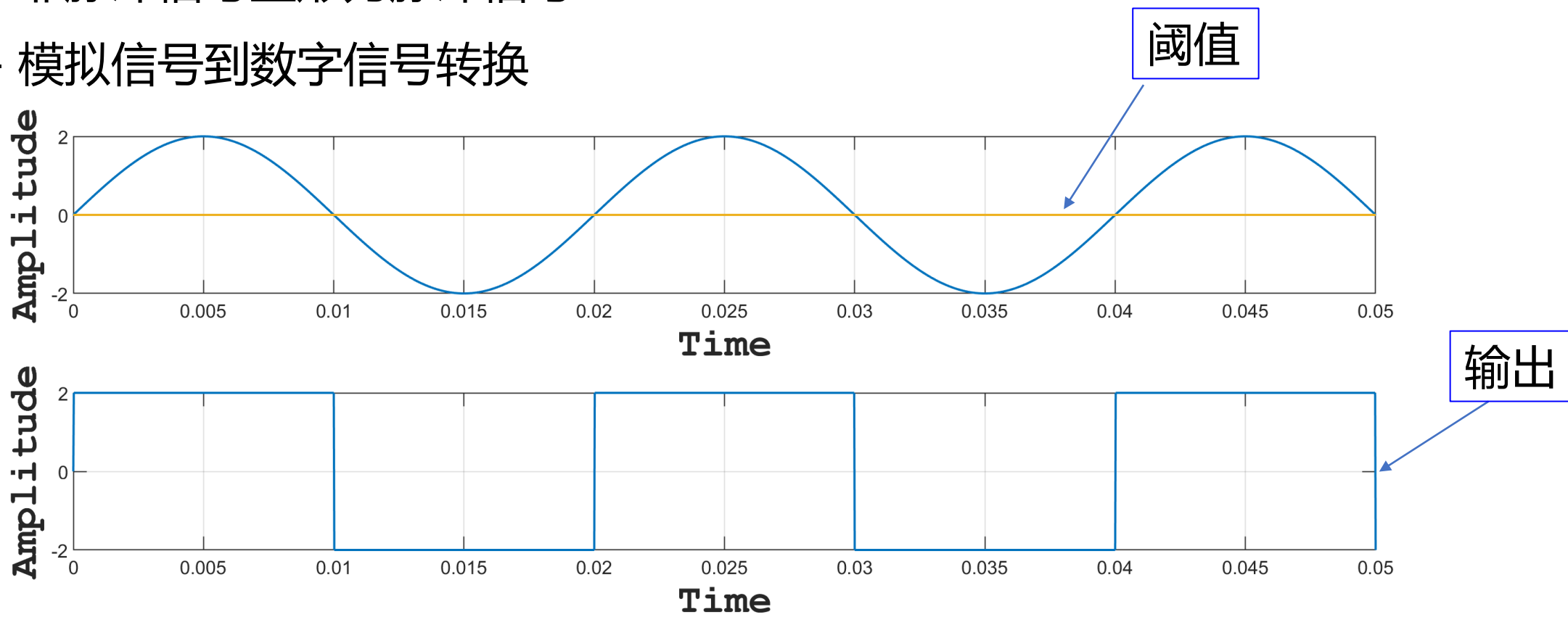
- $U_I > U_H$: D_3 导通, D_4 截止, U_O 高
- $U_I < U_L$: D_3 截止, D_4 导通, U_O 高
- $U_L < U_I < U_H$: D_3 截止, D_4 截止, U_O 低



3.1.1 电压比较器

✓ 比较器用作波形的整形：

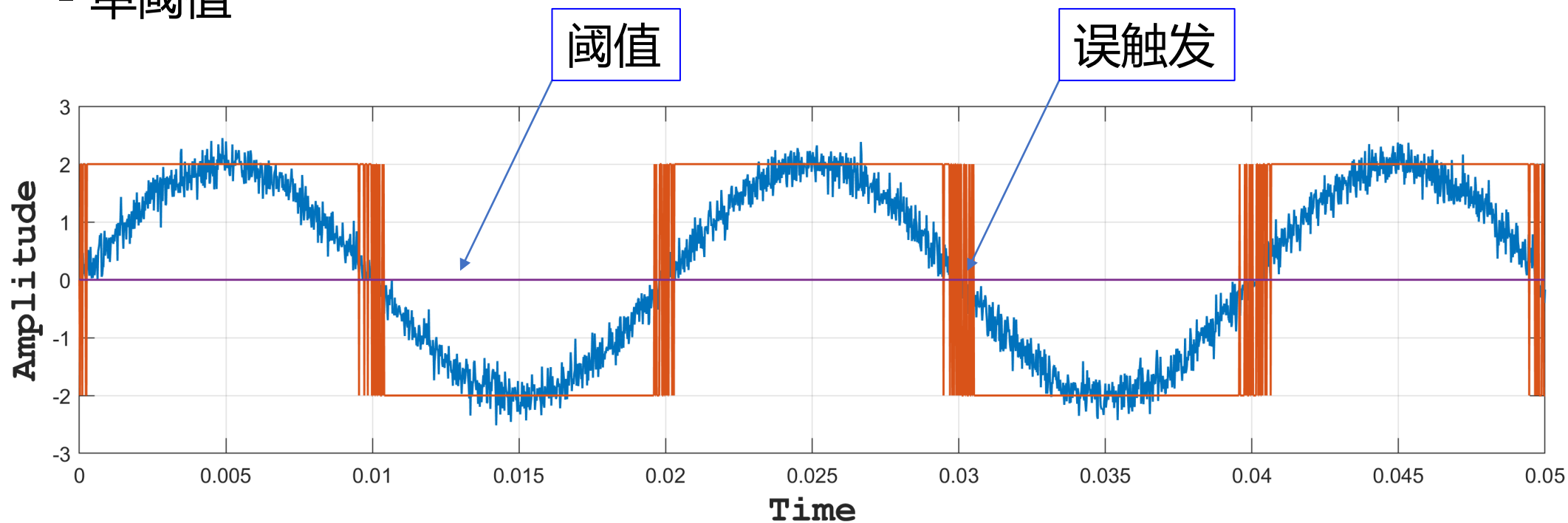
- 非脉冲信号整形为脉冲信号
- 模拟信号到数字信号转换



3.1.1 电压比较器

✓ 比较器用作波形的整形：

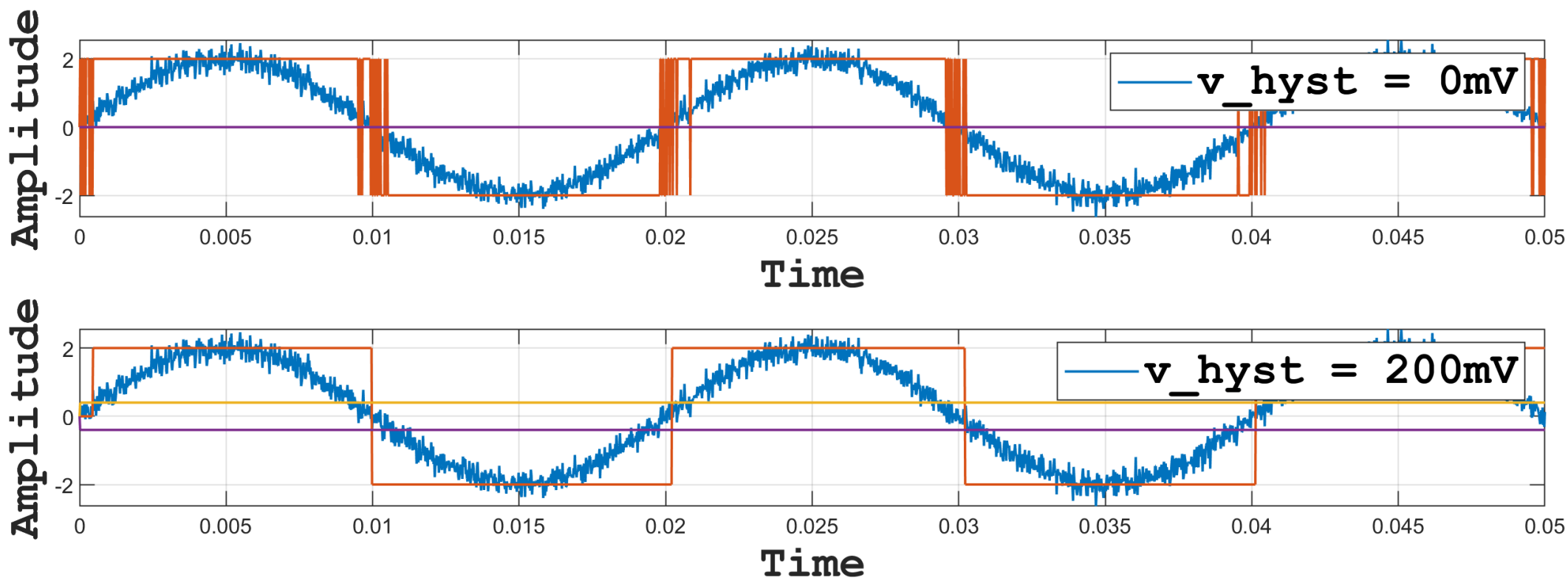
- 信号噪声或者干扰导致**误触发**：信号在阈值附近上下跳动
- 单阈值



3.1.1 电压比较器

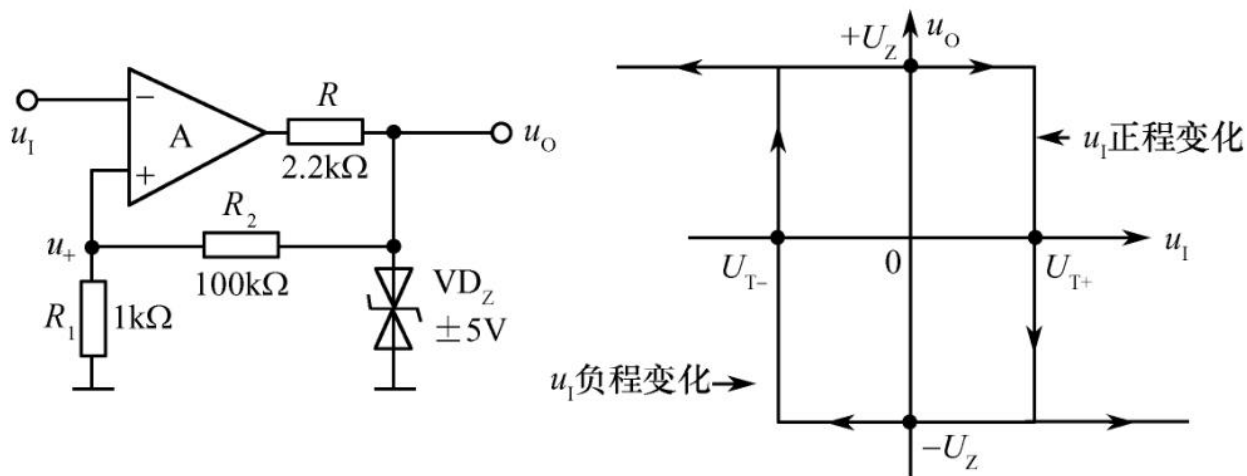
✓ 比较器用作波形的整形：

- 通过双阈值，输出跳变时改变阈值，引入迟滞，抗干扰



3.1.1 施密特比较器

✓ 用放大器实现（正反馈）：正端输入



(a)电路


(b)电压传输特性

已知：
 $u_o = \pm U_Z$

上限阈值
 $U_{T+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$

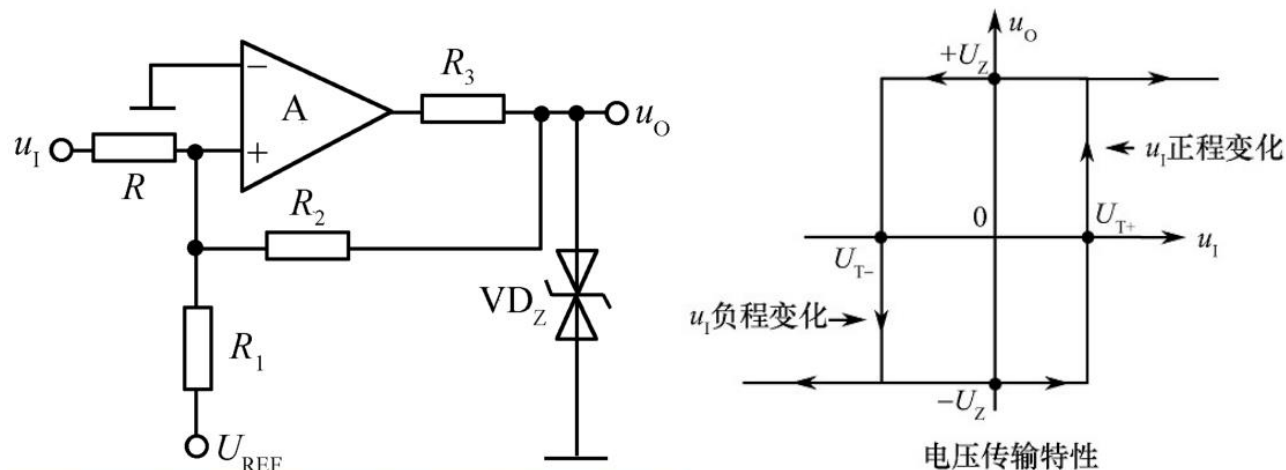
下限阈值
 $U_{T-} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$

回差电压
 $\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} U_Z$



3.1.1 施密特比较器

✓ 用放大器实现（正反馈）：负端输入



$$\frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} u_I + \frac{R \parallel R_2}{R_1 + R \parallel R_2} U_{REF} + \frac{R_1 \parallel R}{R_2 + R_1 \parallel R} u_o = 0$$

$$u_o = +U_Z \Rightarrow u_I = U_{T-} \quad u_o = -U_Z \Rightarrow u_I = U_{T+}$$

$$\text{设 } R_1 = R_2 = R \quad U_{REF} = 1V \quad U_Z = 5V$$



$$u_I = -(U_{REF} \pm U_Z) \quad U_{T-} = -6V \quad U_{T+} = 4V$$

$$\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-} = 2U_Z = 10V$$