



电子线路分析与设计

第 25 讲 波形发生电路

波形发生电路

信号源

周期信号

简单信号

自激振荡

正弦

自由 | 可控

.....

弛豫振荡

方波

三角波

.....

复杂信号

伪噪声源

通信信号

协议数据

.....

非周期信号

噪声源

.....

波形转换

正弦波 \leftrightarrow 方波

三角波 \leftrightarrow 方波

锯齿波 \leftrightarrow 方波

滤波器

比较器

绝对值运算(整流)

调制 / 解调

.....

自激振荡：原理

❓ 基本原理？

- ▶ 自激正反馈： $1 + AF \leq 0$
- ▶ 无输入信号源：自身输出信号
- ▶ 无减法模块后： $1 - AF \leq 0$ 或 $AF \geq 1$

❓ 工作过程？

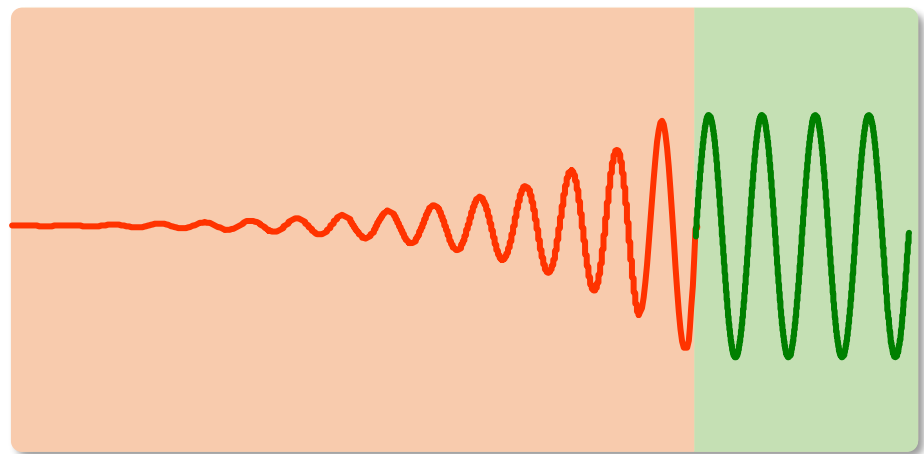
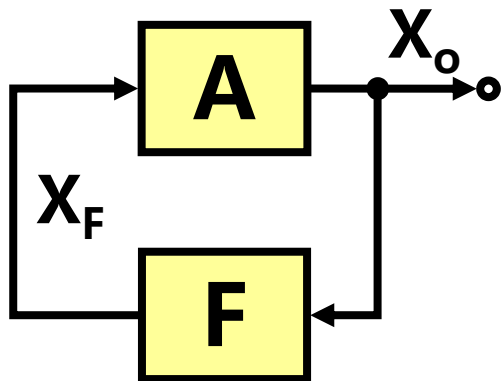
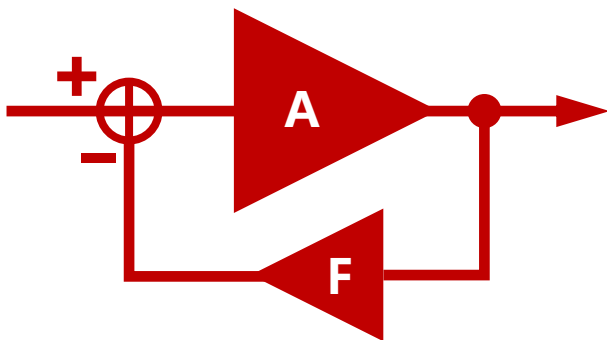
- ▶ 两个阶段
- ▶ 起振阶段：幅度扩大
- ▶ 稳幅阶段：幅度稳定

$$AF > 1$$

$$AF = 1$$

❓ 初始的信号“种子”从何而来？

- ▶ 电路中无处不在的噪声
- ▶ 噪声中含有所有频率成分



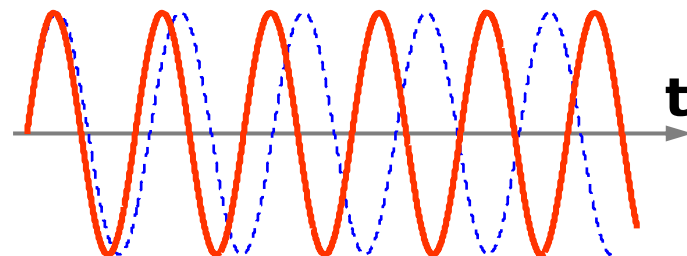
❓ $AF > 1 \rightarrow AF = 1$ 的机理？

- ▶ 内在的：失真...
- ▶ 外在的：负反馈...

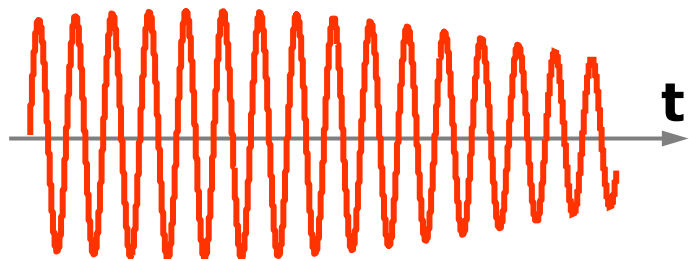
自激振荡：常见异常



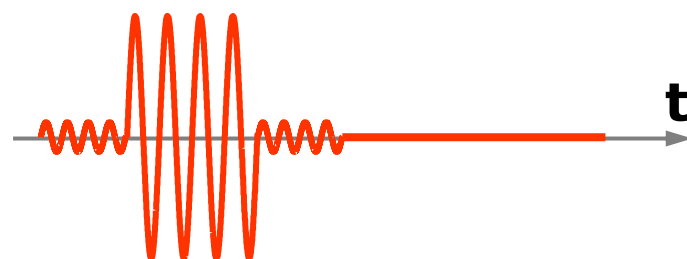
不能起振 不满足起振条件



多模振荡 多频点满足起振条件



幅度不稳 稳幅机制不可靠



间歇振荡 起振 \rightarrow 非线性 $\rightarrow Q \rightarrow AF \dots$

特殊：启动时间非常长 临界满足 $AF > 1$ ，微小失真即达稳幅 \rightarrow 边限振荡器

自激振荡：评估指标

- ☑ 是否容易起振
 - ☑ 频率精确性：误差
 - ☑ 频率稳定性：长期稳定性和短期稳定性
 - ☑ 随机性(噪声)：幅度的抖动，相位的抖动（相位噪声）
 - ☑ 适用的频段：高频段，低频段
 - ☑ 非线性失真：谐波含量
 - ☑ 是否方便调节：范围、连续可调|步进、多处联调
 - ☑ 是否需特殊结构：晶体、恒温槽、冷原子...
 - ☑ 其它属性：封装、尺寸、重量、工作温度、抗震性(三维)
- } 稳准度 (PPM)

自激振荡：要素

❓ 构造自激振荡的条件？

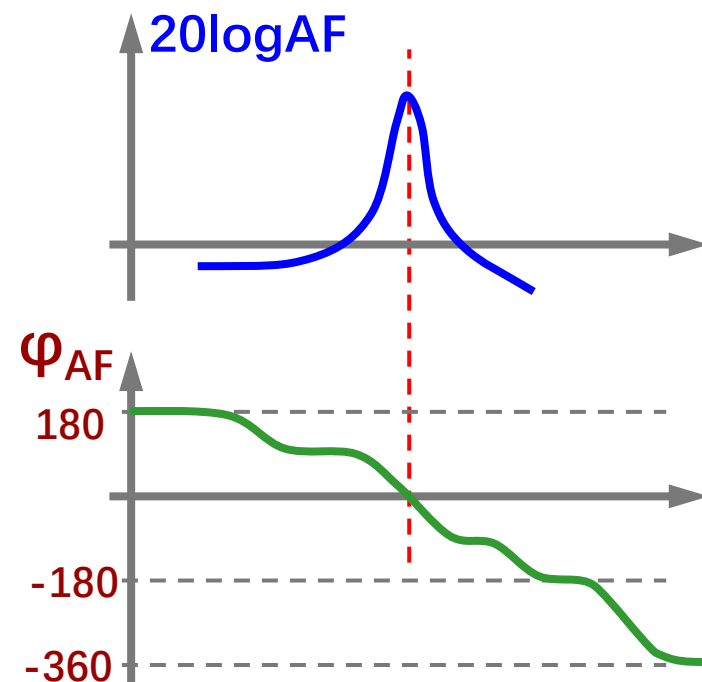
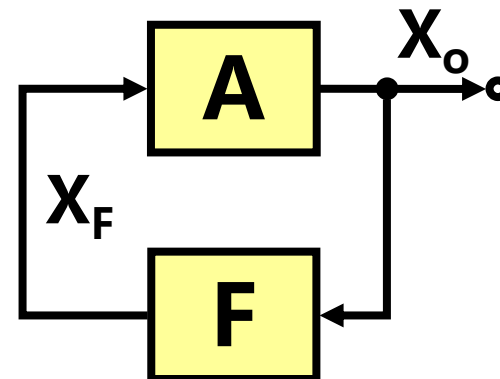
- ▶ 放大电路：产生增益，注入能量
- ▶ 反馈网络：构成正反馈
- ▶ 稳幅机制： AF 能自动缩小
- ▶ 选频机制：仅单一频率满足上述条件

❓ 如何搭配？

- ▶ 多数搭配：A 宽带，F 选频
- ▶ 其他，如：仅 f_0 处正反馈强于负反馈

❓ 振荡频率如何确定？

- ▶ $AF(f)$ 幅度连续：一定范围内都满足
- ▶ $\varphi_{AF}=0$ ：单一过零点 → 一般用相位条件计算 f_0



自激振荡：示例 1

❓ 构造自激振荡的条件？

- ▶ 放大电路
- ▶ 反馈网络
- ▶ 稳幅机制
- ▶ 选频机制

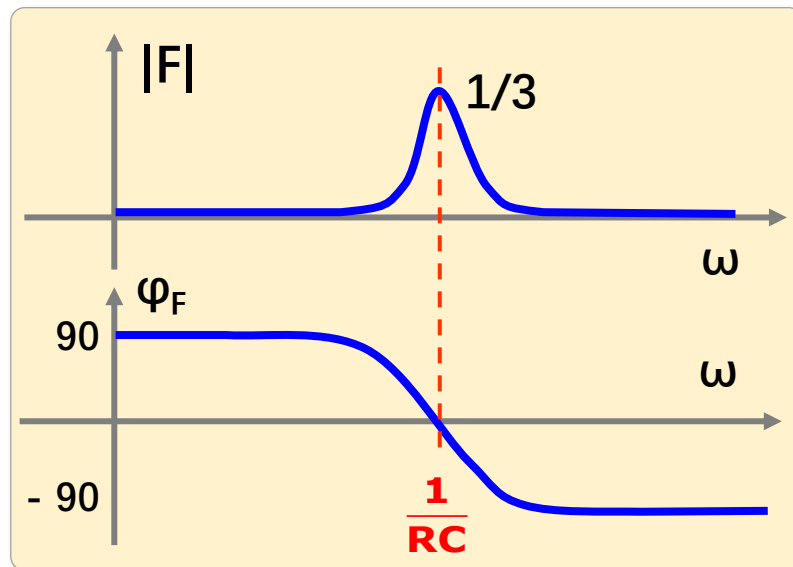
- 1 运放同相放大器
- 2 RC串并联(文氏桥)
- 3 选频特性
- 4 稳幅机制

❓ R_F , R_0 数值如何选取？

正温度系数

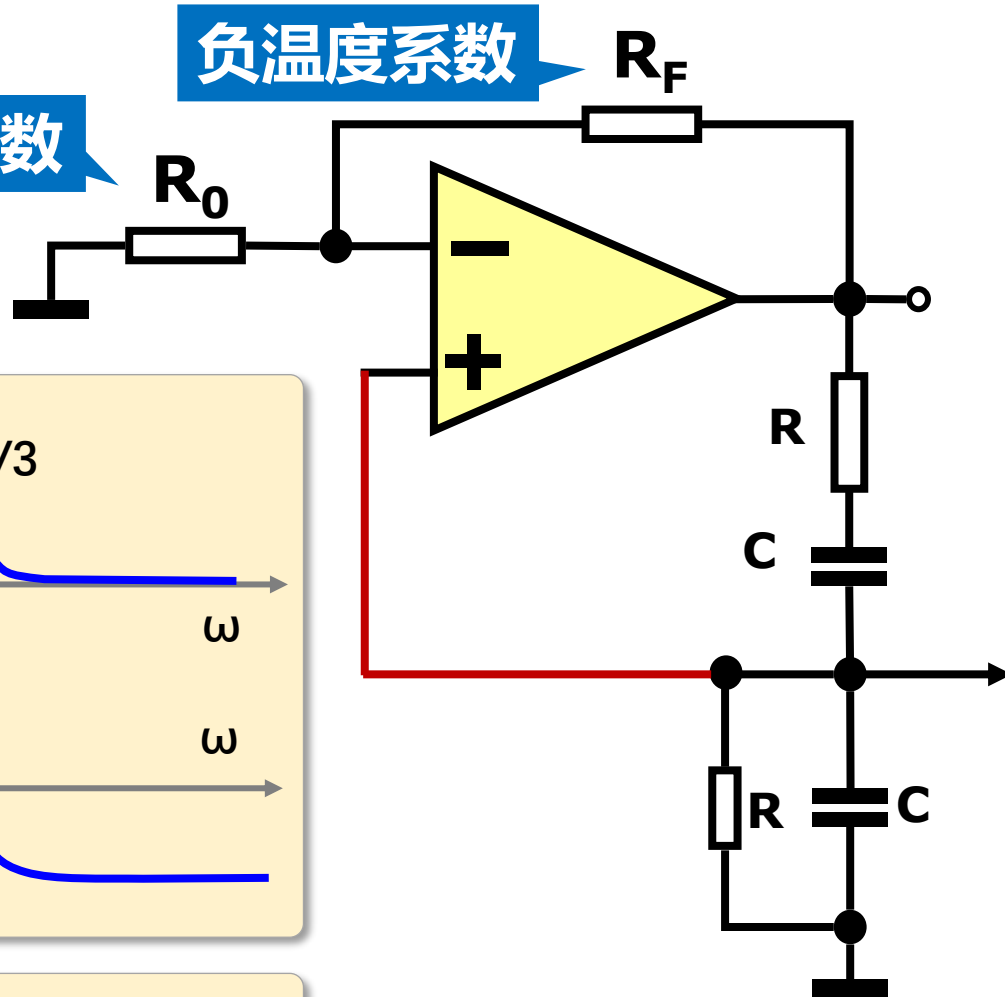
负温度系数

自激原理



$$F = \frac{1}{3 + j\left(RC\omega - \frac{1}{RC\omega}\right)}$$

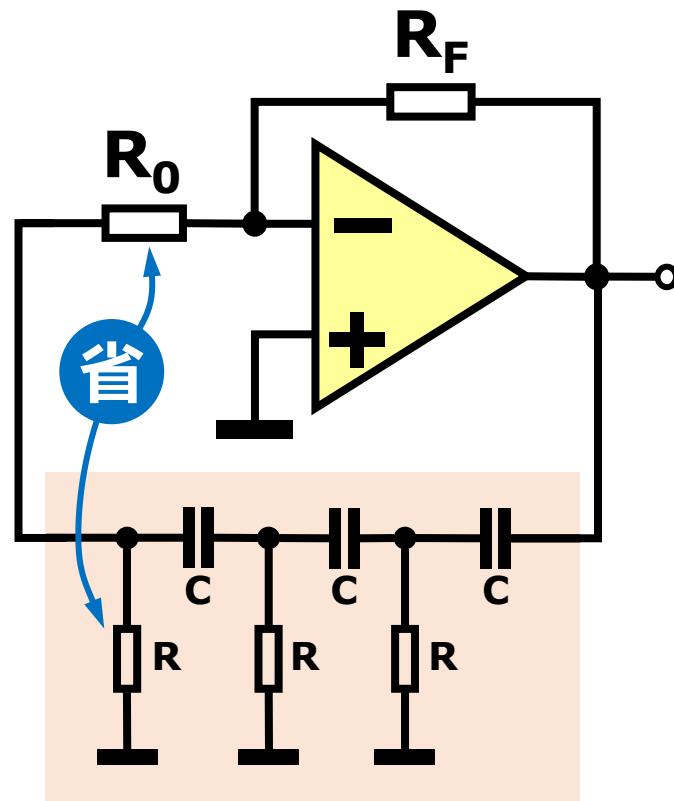
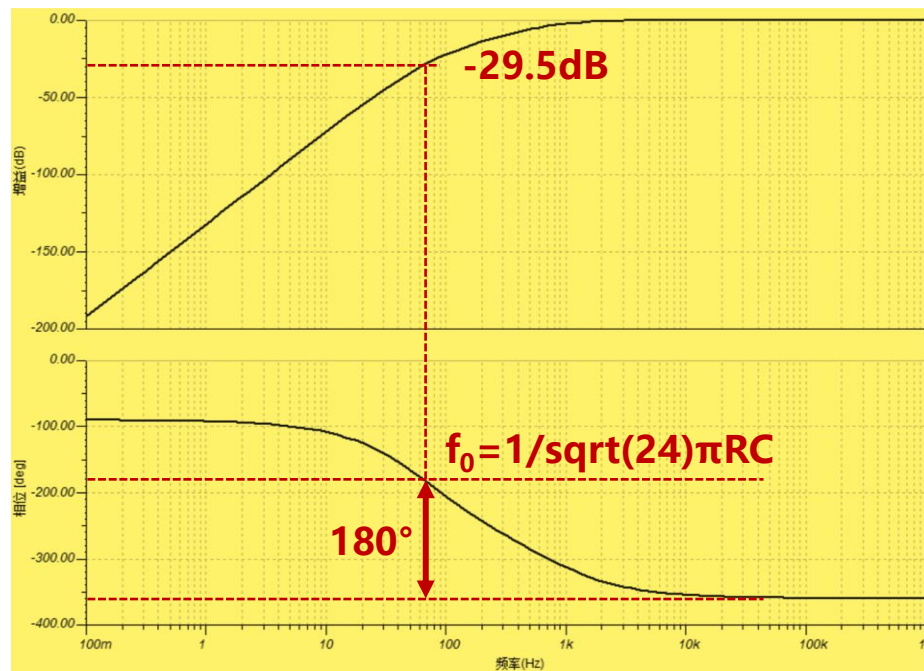
- $\omega_0 = 1/RC$ 时
- ☑ $|F|_{\max} = 1/3$
 - ☑ $\varphi_F = 0$



自激振荡：示例 2

? 构造自激振荡的条件？

- ▶ 放大电路
- ▶ 反馈网络
- ▶ 稳幅机制
- ▶ 选频机制



自激原理

? 实际振荡频率？

- ▶ 明显偏离 f_0
- ▶ A 与 F 相互影响
- ▶ .. 省去两个电阻

- 1 反相放大器
- 2 RC三阶高通
- 3 选频特性
- 4 稳幅机制

无稳幅机制 → 失真明显

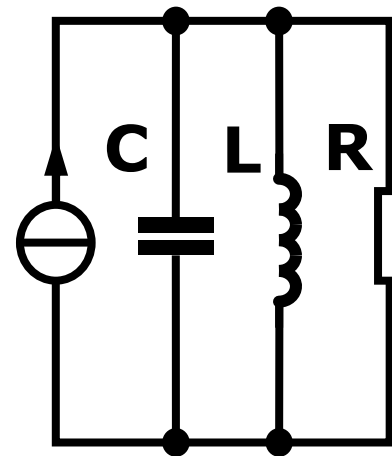
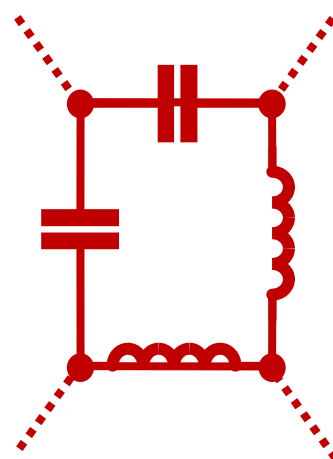
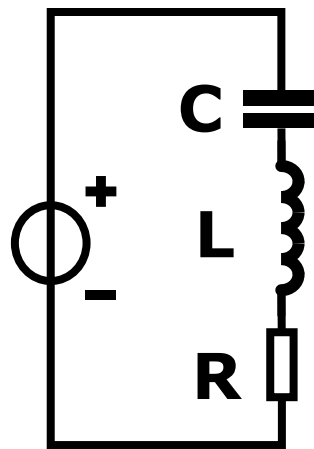
因为需要较大失真以降低 AF

LC振荡：原理

- ❗ 自激 + LC 滤波
 - ▶ 机理本质并无不同
 - ▶ LC 谐振电路有其特色

- ❗ LC 串联|并联谐振
 - ▶ 定义品质因数 Q

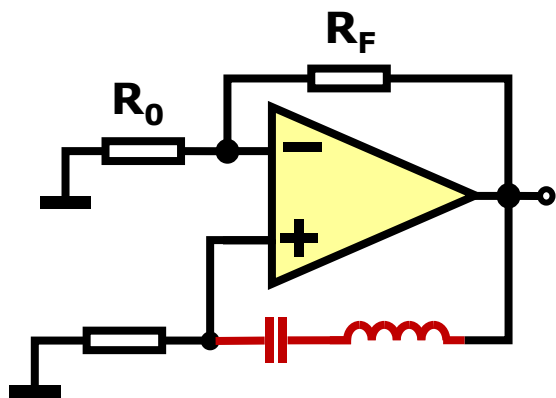
- ❗ 高 Q 场景
 - ▶ 忽略 $R \rightarrow$ 同一无源网络
 - ▶ Tank Circuit
 - ▶ 多个 LC 的情形 ..
 - ▶ L 与 C 之间交换能量
 - ▶ 其它支路电流可以忽略



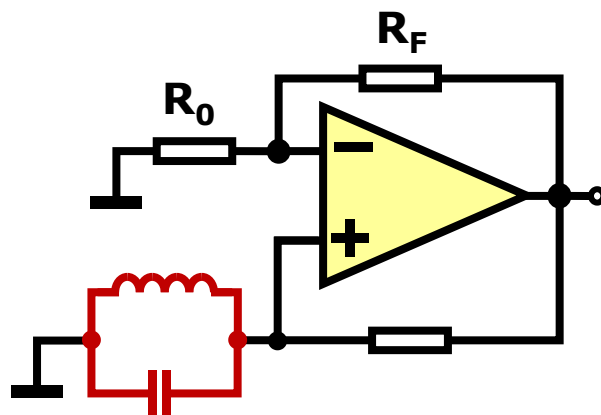
串联谐振

并联谐振

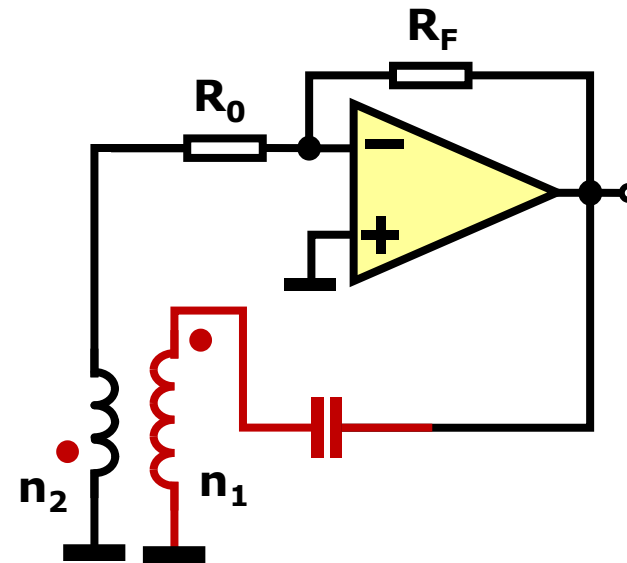
LC振荡：典型 1：运放



- ❗ 同相放大
‣ 串联谐振反馈



- ❗ 同相放大
‣ 并联谐振反馈



- ❗ 反相放大
‣ 串联谐振变压反馈

谐振频率均为： $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$

f_0 时有最大正反馈

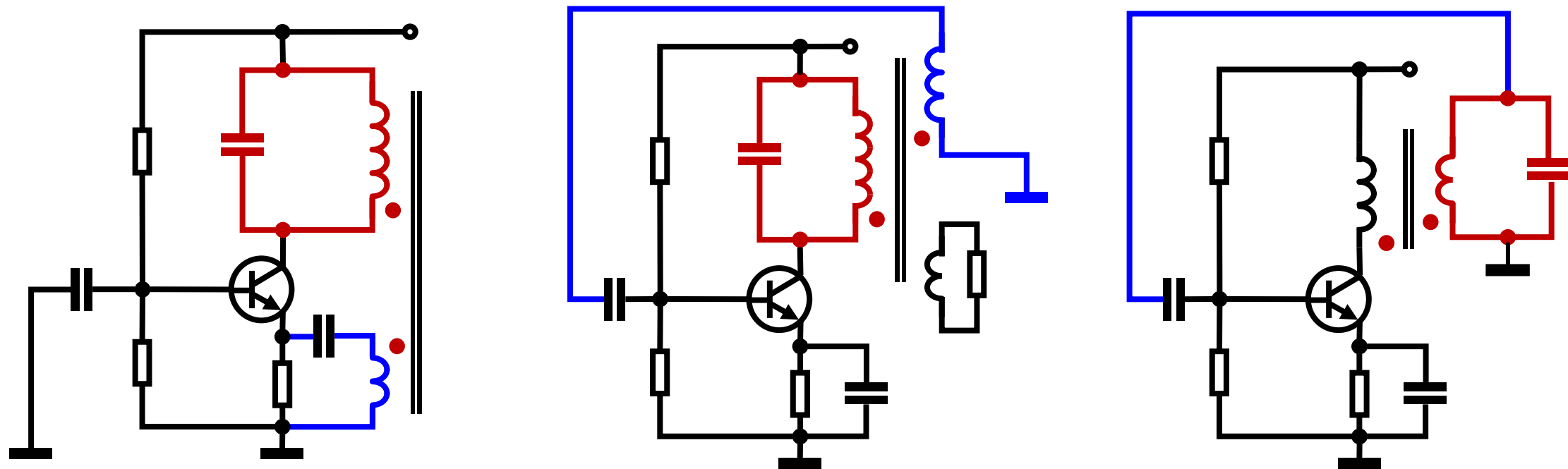
稳定幅度均依赖放大器饱和

输出端显著失真，输入端失真较小

- ❓ 放大器增益要求？
‣ 前两个自动满足 ‣ 第三个： $R_F/R_0 > n_1/n_2$

LC振荡：典型 2：BJT

Armstrong
振荡电路



LC
振荡

❗ CB 同相 + 同相反馈*

❗ CE 反相 + 反相反馈*

选频：

$$\approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

误差：

闭环
引入

稳幅：

依赖
饱和

失真：

比较
明显

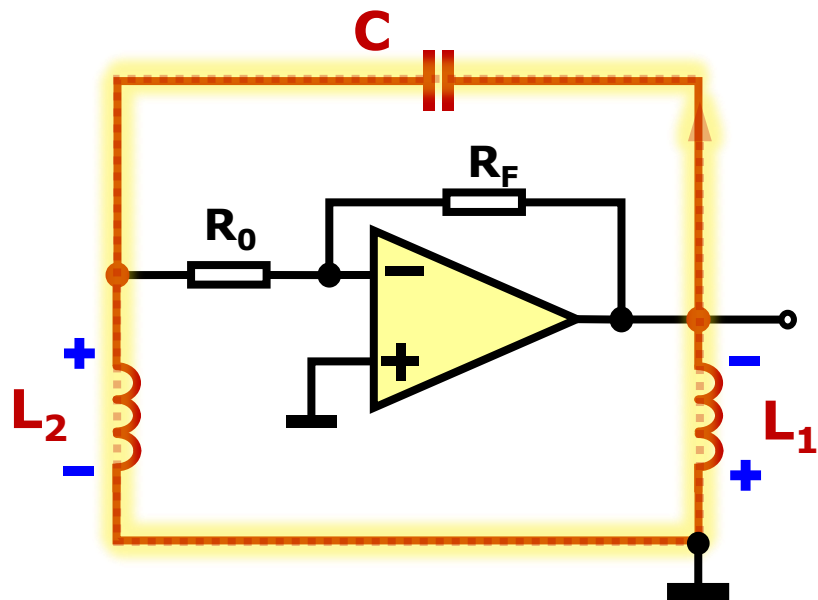
$AF > 1$

并不
容易

闭环后 A 并不大

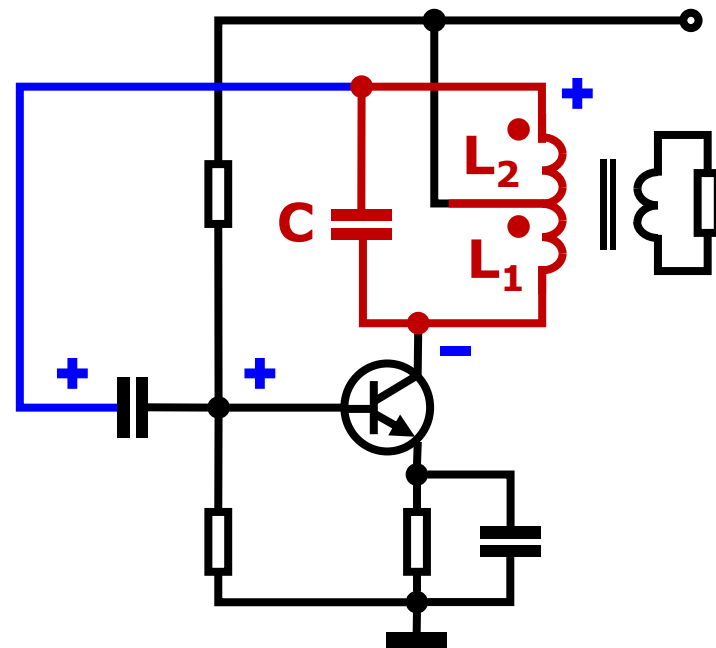
F 增大 → Q 受影响

LC振荡：典型 3：Hartley



! 电感三点式

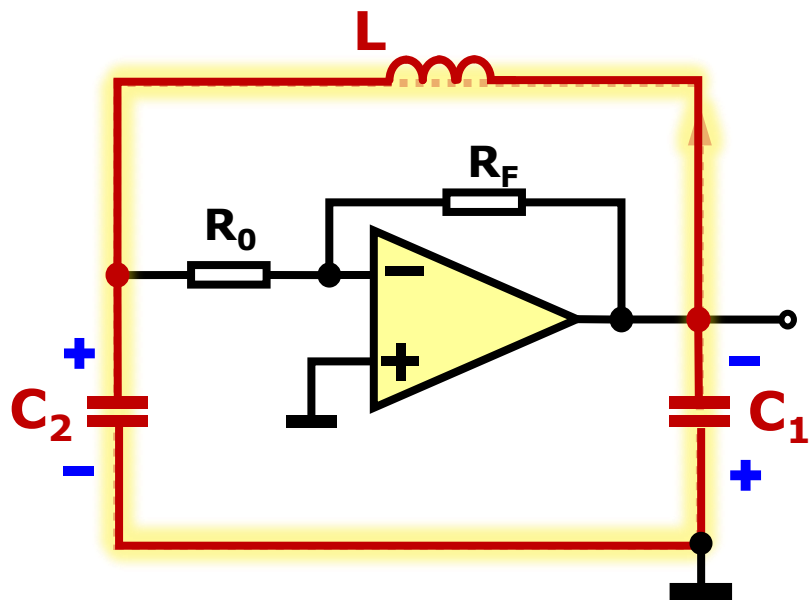
- ▶ 这是反相反馈？！
- ▶ 高 Q ：环路外 I 可忽略
- ▶ $f_0 = 1/2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}$
- ▶ $AF > 1$ ： $R_F/R_0 \times L_2/L_1 > 1$



! Hartley振荡器：始于BJT

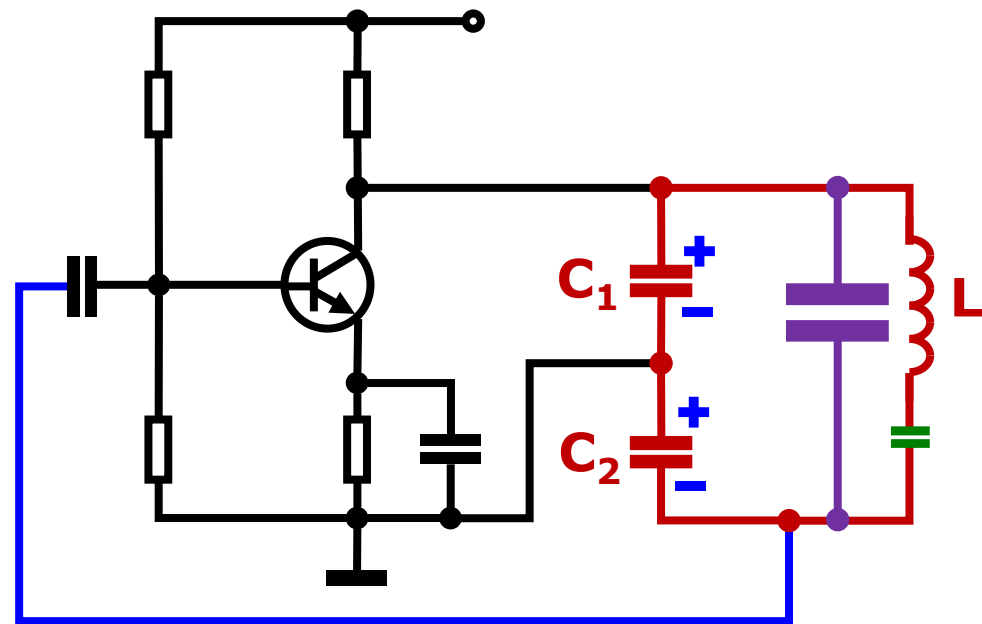
- ▶ 反相放大+电感抽头反相反馈
- ▶ $f_0 = 1/2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}$
- ▶ 调谐频率：改 C 或 M
- ▶ $AF > 1$ ： $\frac{\beta R'_C}{r_{be}} \frac{L_2 + M}{L_1 + M} > 1$
- ▶ AF 略大于 1 \rightarrow 可起振而失真小

LC振荡：典型 4：Colpitts



! 电容三点式

- ▶ 这是反相反馈？！
- ▶ 高 Q：环路外 I 可忽略
- ▶ $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L(C_1C_2)/(C_1 + C_2)}$
- ▶ $AF > 1$: $R_F/R_0 \times C_1/C_2 > 1$



LC
振荡

! Colpitts 振荡器：始于 BJT

- ▶ $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L(C_1C_2)/(C_1 + C_2)}$
- ▶ $AF > 1$: $\frac{\beta R'_C}{r_{be}} \frac{C_1}{C_2} > 1$
- ▶ 使调谐与起振分开：一些改进

Clapper 改进：
L 串联小电容

Seiler 改进：
L 并联大电容

晶体振荡器：来由

❗ RC 振荡器的情况

- ▶ 最多到 MHz 量级
- ▶ 高频稳准度很差

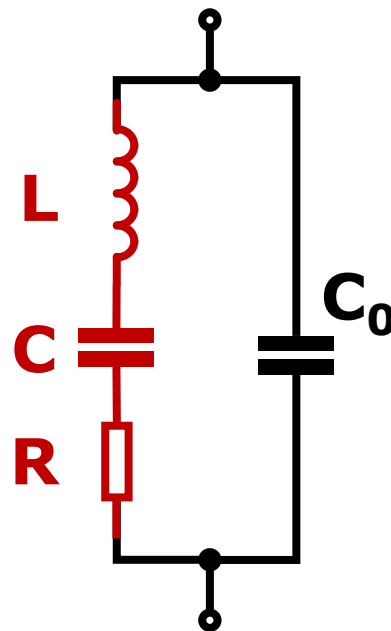
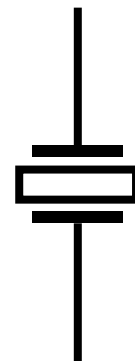
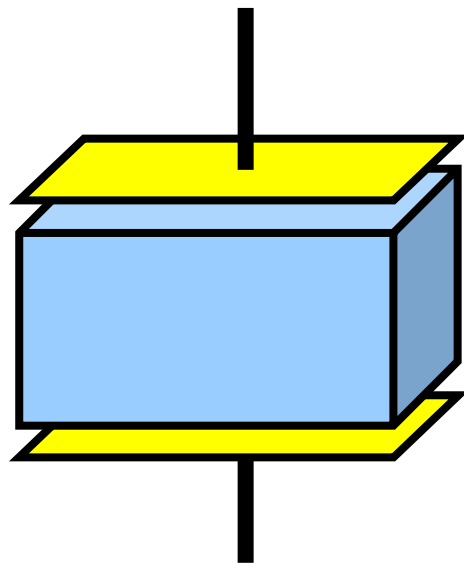
❗ LC 振荡器的情况

- ▶ 可工作到 100MHz 量级
- ▶ Q 可到 $10^3 \sim 10^4$ 数量级

❓ 高 Q 之物？

- ▶ 音叉振动： 10^4
- ▶ 微波谐振电路： 10^5
- ▶ 石英机械振动： 10^6
- ▶ 光子晶体谐振腔： 10^9

品质中上
压电效应
便宜易得
尺寸 $\rightarrow f_0$

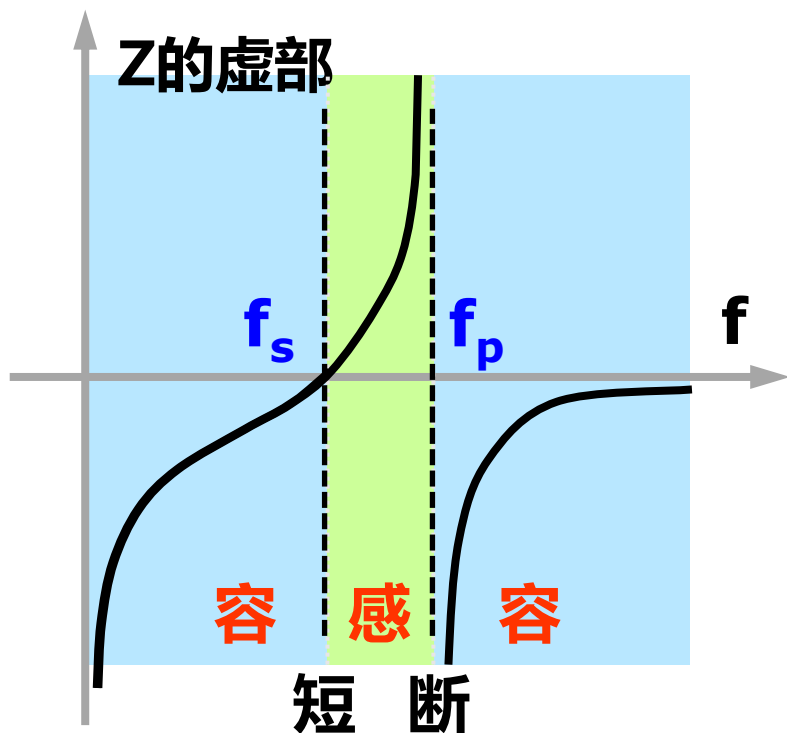


❓ 石英晶体的电路模型？

- ▶ 机械谐振 \rightarrow LC 谐振
- ▶ 惯性 $\rightarrow L$
- ▶ 弹性 $\rightarrow C$
- ▶ 损耗 $\rightarrow R$
- ▶ 极板 \rightarrow 并联 C_0

适于 MHz
 $\sim 100\text{MHz}$

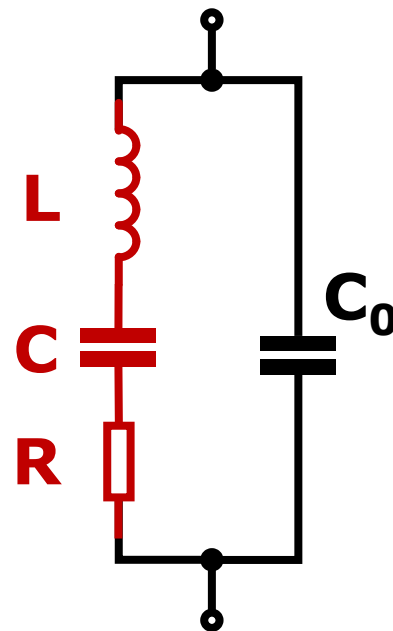
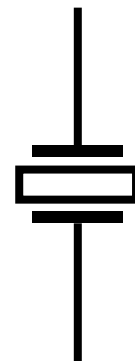
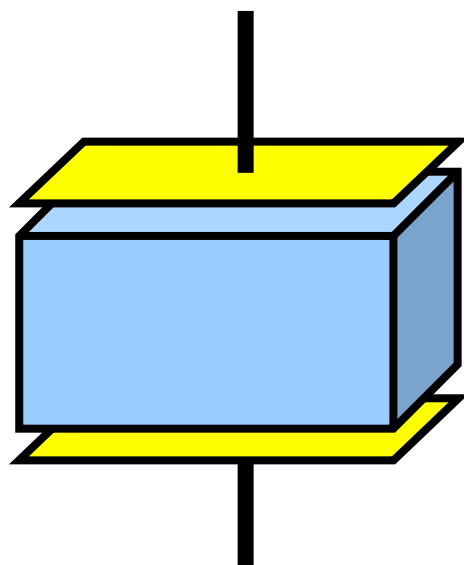
晶体振荡器：电特性



只是 Z 虚部

短路、断路均为近似

f_s 和 f_p 非常接近



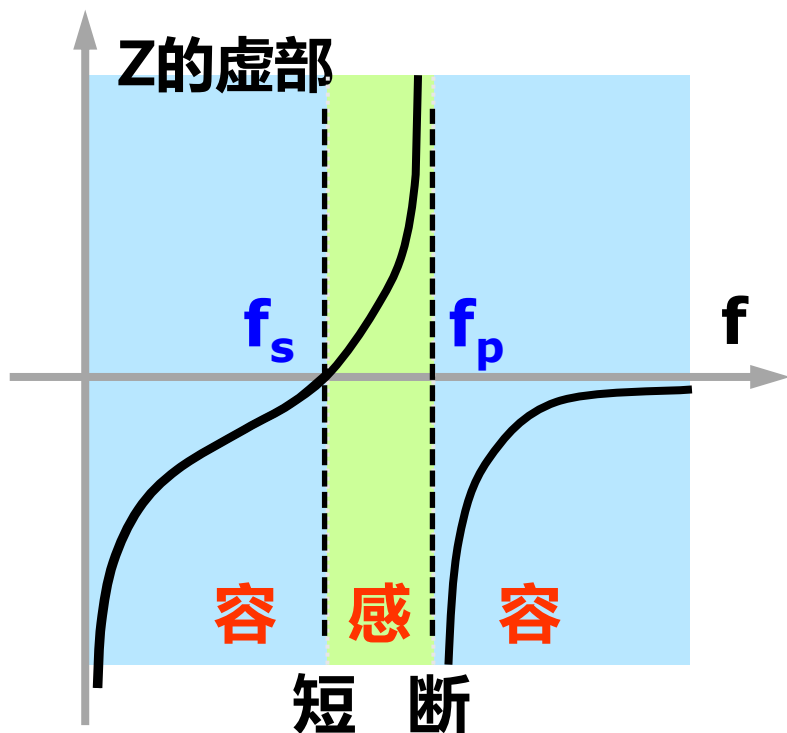
? 总阻抗 Z 的频率特性？

- ▶ $< f_s$: 容性
- ▶ $= f_s$: LC 串联谐振
- ▶ $> f_s$: 感性
- ▶ $= f_p$: 与 C_0 并联谐振
- ▶ $> f_p$: 容性

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{CC_0}{C + C_0}}}$$

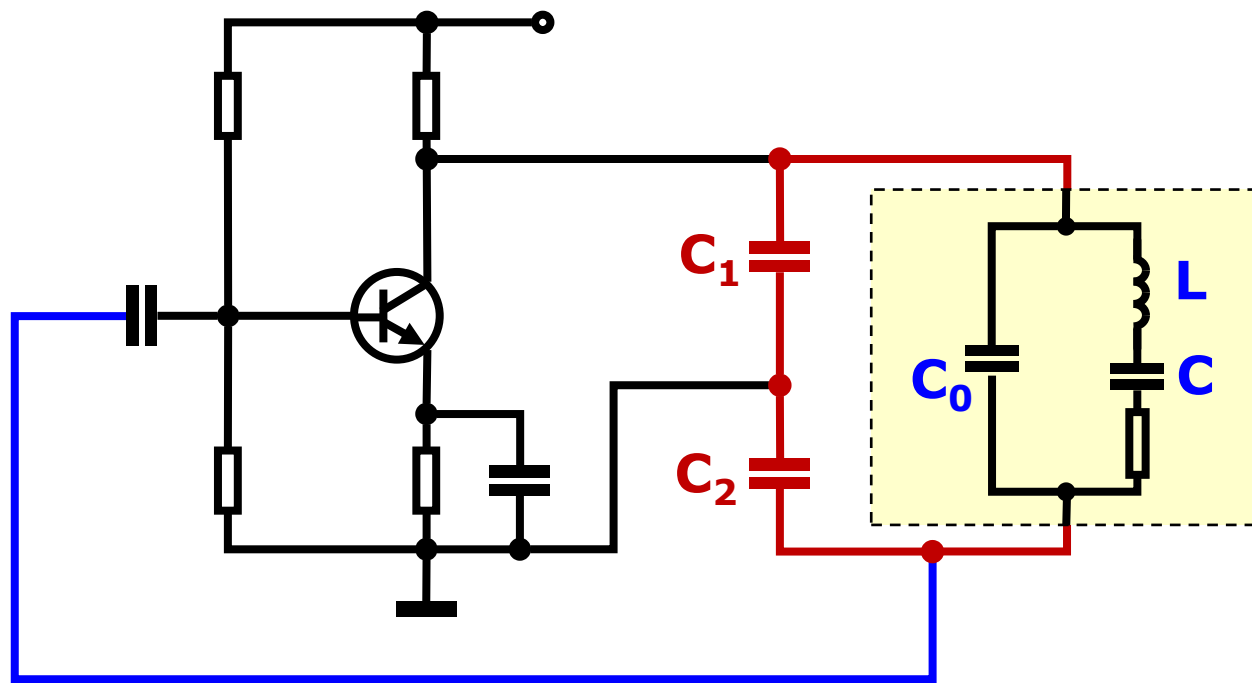
晶振：并联型



只是 Z 虚部

短路、断路均为近似

f_s 和 f_p 非常接近

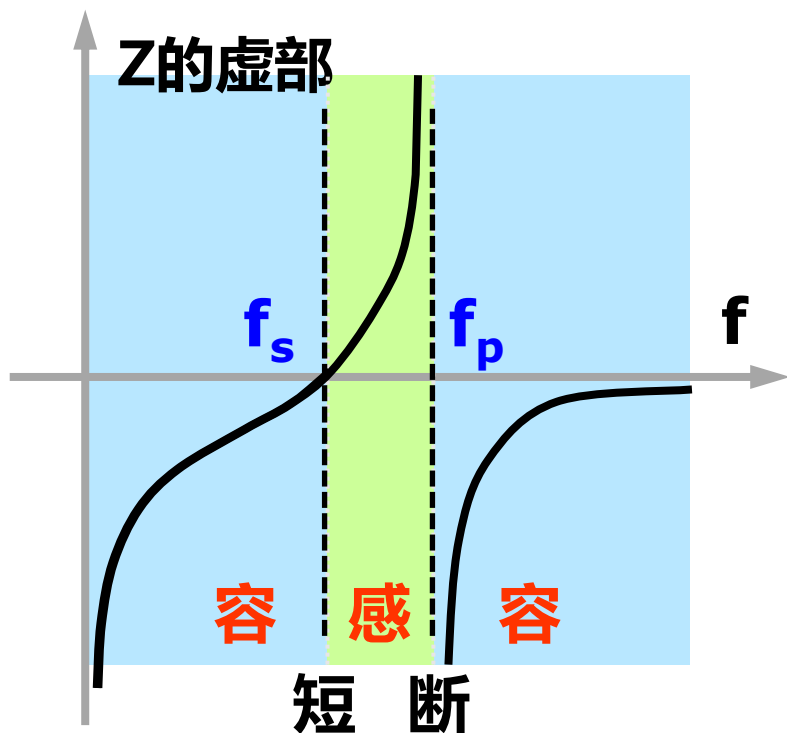


❗ 将晶体当做电感来用

- ▶ 使用电容三点式振荡器
- ▶ 用晶体替换 L
- ▶ 谐振频率
- ▶ 在 f_s , f_p 之间

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C(C_0 + C_{1\&2})}{C + C_0 + C_{1\&2}}}}$$

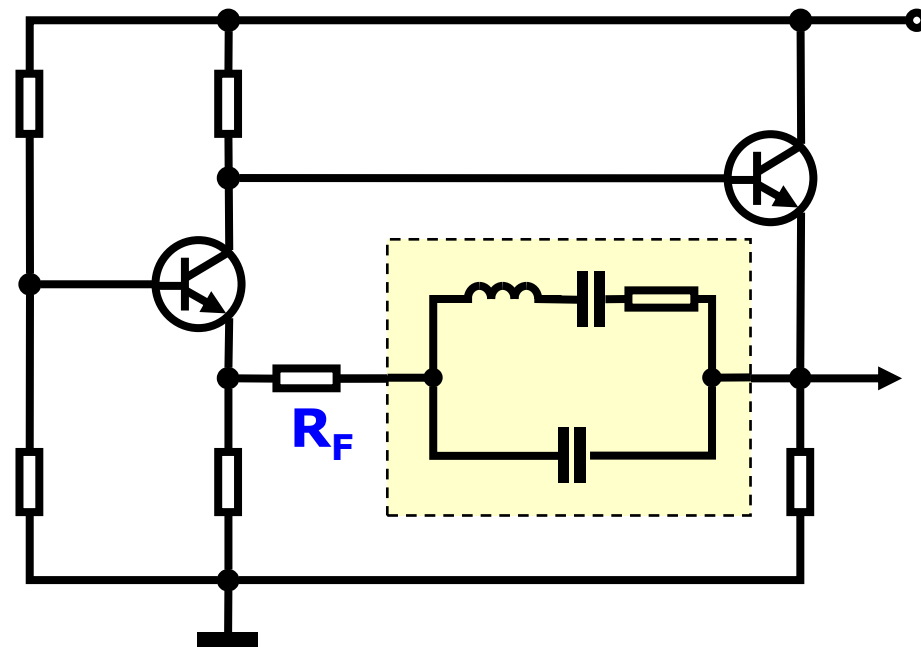
晶振：串联型



只是 Z 虚部

短路、断路均为近似

f_s 和 f_p 非常接近



❗ 仅当 f_s 时晶体阻抗最小

- ▶ 构造正反馈电路
- ▶ 反馈支路中引入晶体
- ▶ f_s 处有同相正反馈
- ▶ 串联电阻 R_F 可以调节 F

$$f_0 = f_s$$

弛豫振荡：原理

? 多谐波电路

- ▶ Multivibrator
- ▶ 系统有两个状态
- ▶ 两状态间可互相跳转
- ▶ 可分为三种子类型

触发器

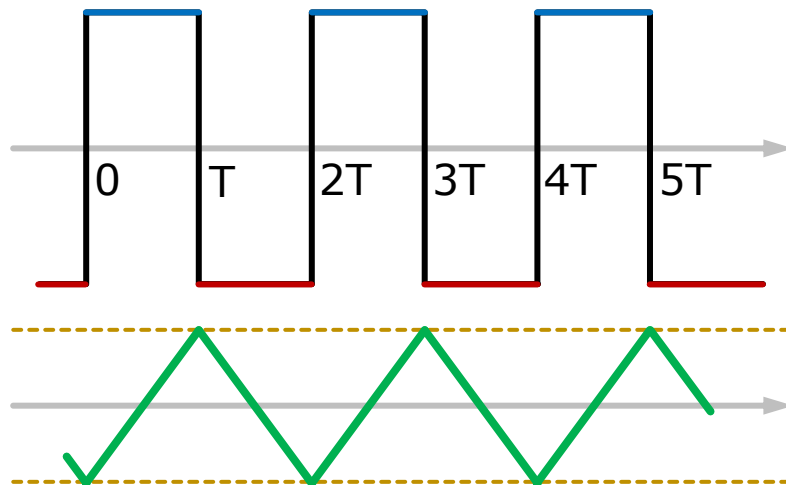
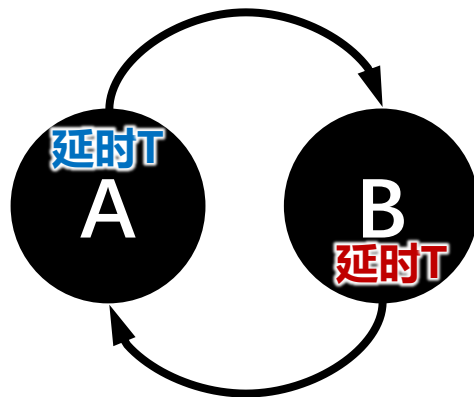
两状态均稳定
存储 1 bit 数据

定时电路

一个状态稳定
激发后延时跳转

弛豫振荡

两状态均不稳定
自动来回跳转

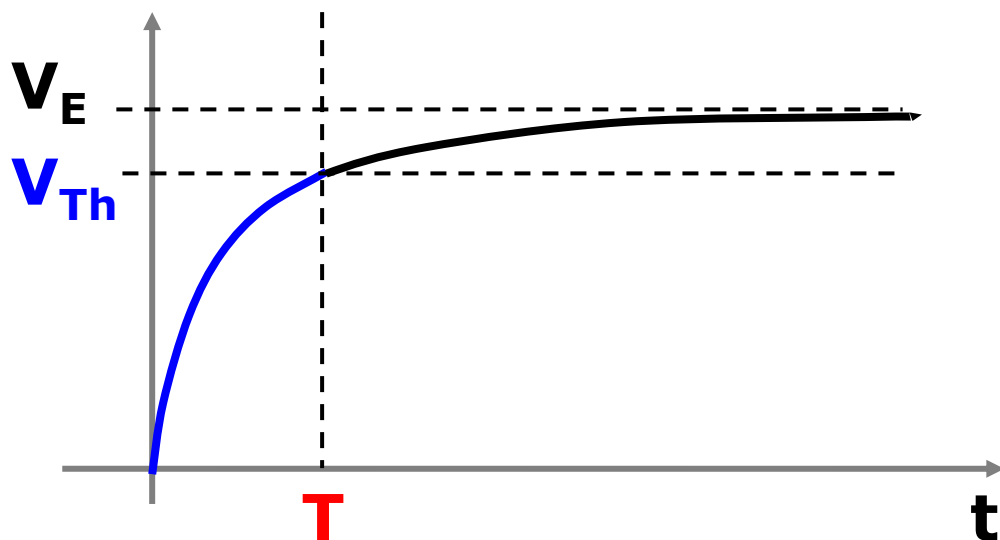


? 弛豫振荡的构造

- ▶ 状态输出为方波
- ▶ 是谓“多谐波”振荡
- ▶ 核心：放大器+延迟
- ▶ 弛豫 = Relaxation
- ▶ 1~2 电容来回充放电
- ▶ 需要两个比较器：判断充电和放电的情况



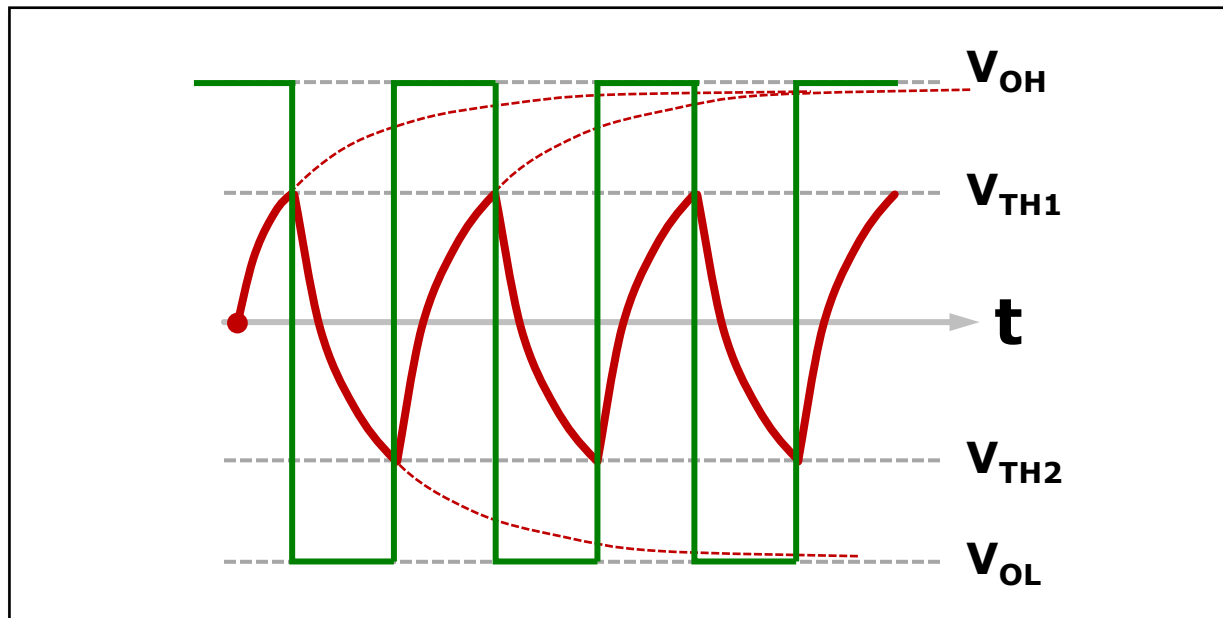
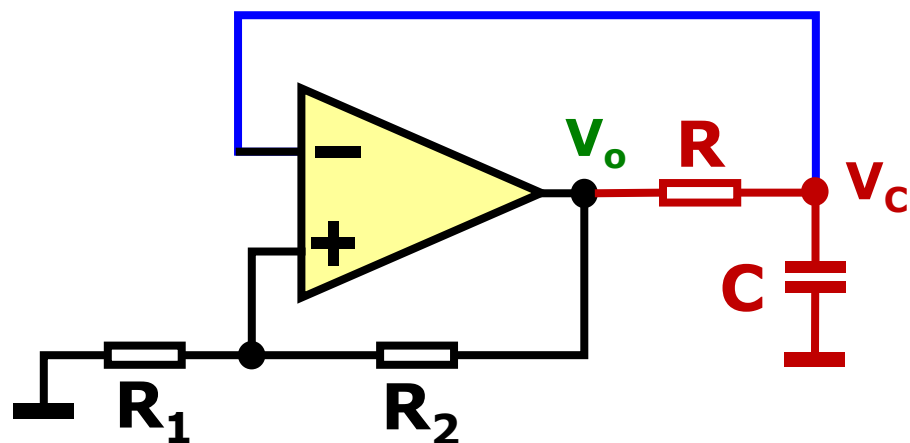
方波发生



- ☑ 一阶 RC 充放电电路的时间计算
 - 充放电函数均为收敛的指数函数
- ☑ 不妨设零时刻电压为0，终态为 V_E
- ☑ 电压波形为： $V(t) = V_E(1 - e^{-t/RC})$
- ☑ 计算到达 V_{Th} 的时间 T
 - $T = -RC \times \ln[(V_E - V_{Th})/V_E]$

$$T = RC \cdot \ln\left(\frac{\text{总跳变幅度}}{\text{剩余幅度}}\right)$$

弛豫振荡：方波发生器



❗ 滞回比较器：

- ▶ $V_{TH1} = V_{OH} R_1 / (R_1 + R_2)$
- ▶ $V_{TH2} = V_{OL} R_1 / (R_1 + R_2)$

❗ RC 充放电回路

- ▶ 三要素法算响应
- ▶ $V(t) = V_E - \Delta V \cdot e^{-t/RC}$

❓ 反馈电路运作过程？

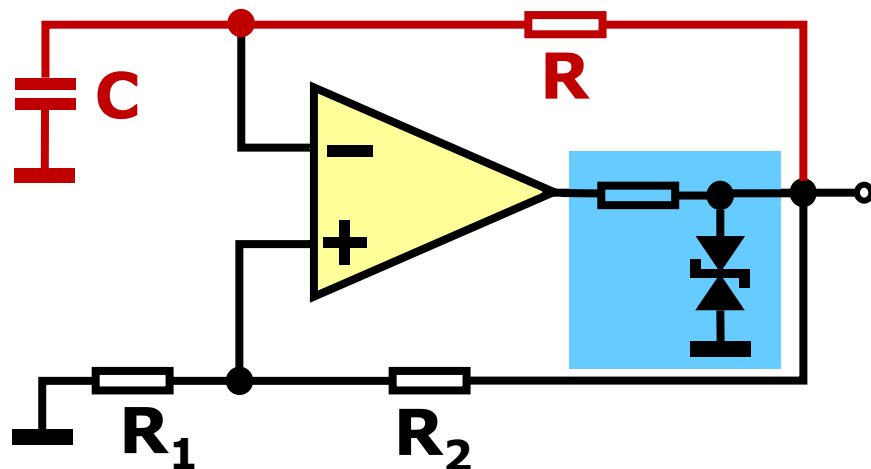
- ▶ 设初始输出 V_{OH} , $V_C = 0$
- ▶ 电容正向充电
- ▶ 充至 V_{TH1} 输出翻转为 V_{OL}
- ▶ 电容放电 → 反向充电 ...
- ▶ 反充至 V_{TH2} 输出变为 V_{OH}
- ▶

❓ 周期计算？

- ▶ 初始 V_{TH2}
- ▶ 收敛于 V_{OH}
- ▶ 中止于 V_{TH1}
- ▶ 时间常数 RC

$$\frac{T}{2} = RC \cdot \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

弛豫振荡：变型



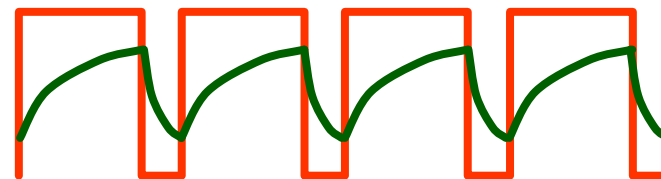
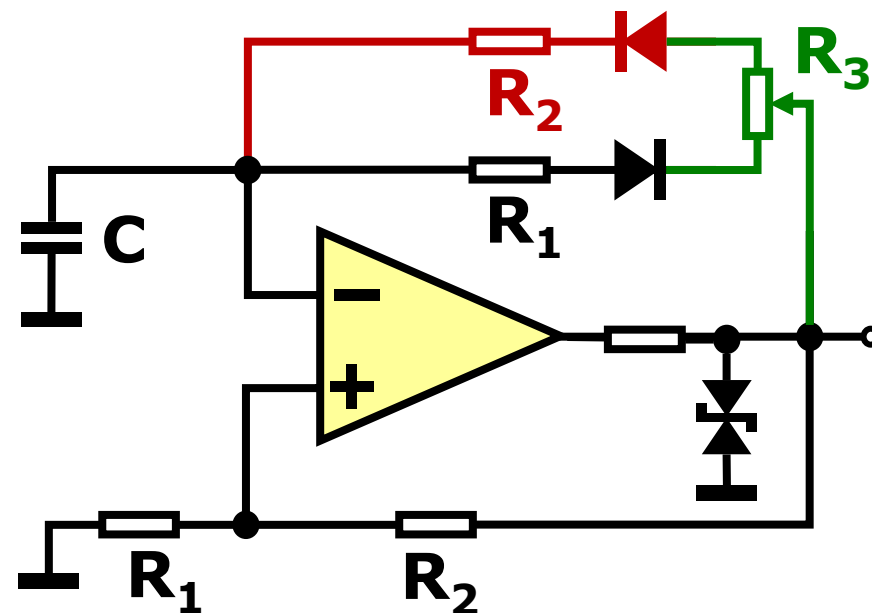
$$\frac{T}{2} = RC \cdot \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right)$$

❓ 如何调节周期？

▶ 调节 R | C | R_1 | R_2 均可

❗ 如何确保 $|V_{OH}| = |V_{OL}|$ ？

▶ 引入双向稳压器



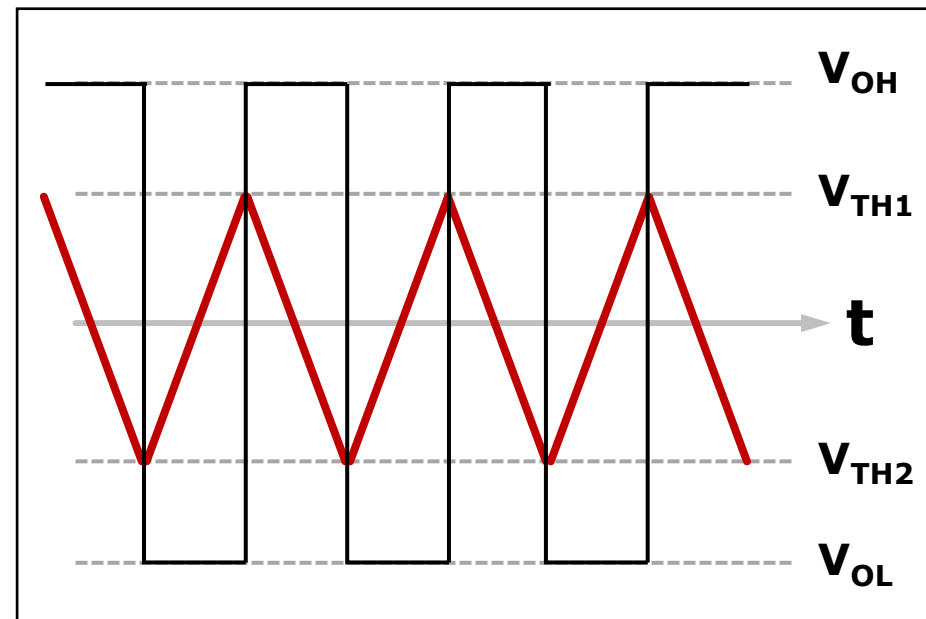
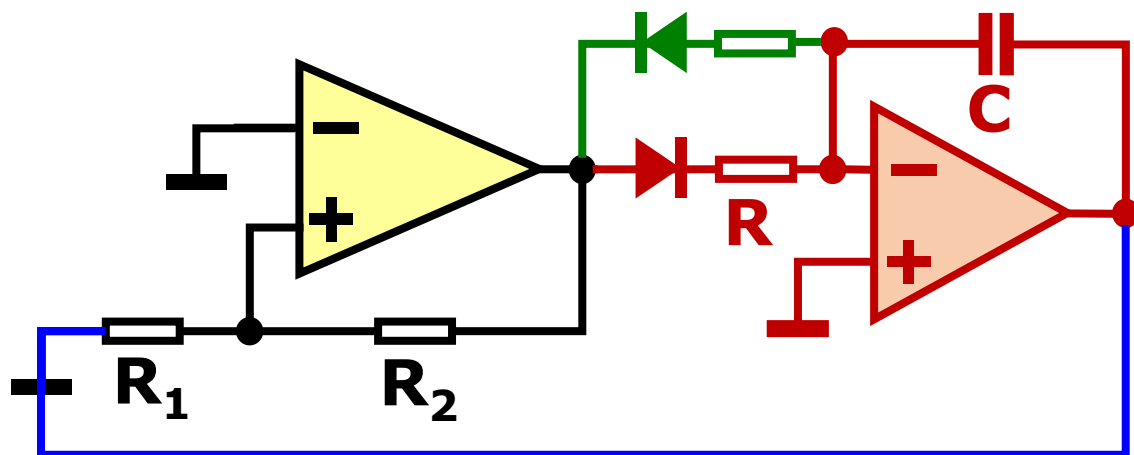
❓ 如何产生不对称方波？

▶ C 充放电要走不同支路

❓ 如何 T 不变而调节占空比？

▶ 维持 $R_1 + R_2 + R_3$ 不变

弛豫振荡：变型：三角波



❗ V_C 需按直线变化

- ▶ 改用理想积分器
- ▶ 积分运算是反相的
- ▶ 补一个反相放大器？可以
- ▶ 反馈到同相端：更方便
- ▶ 仍然是滞回比较器

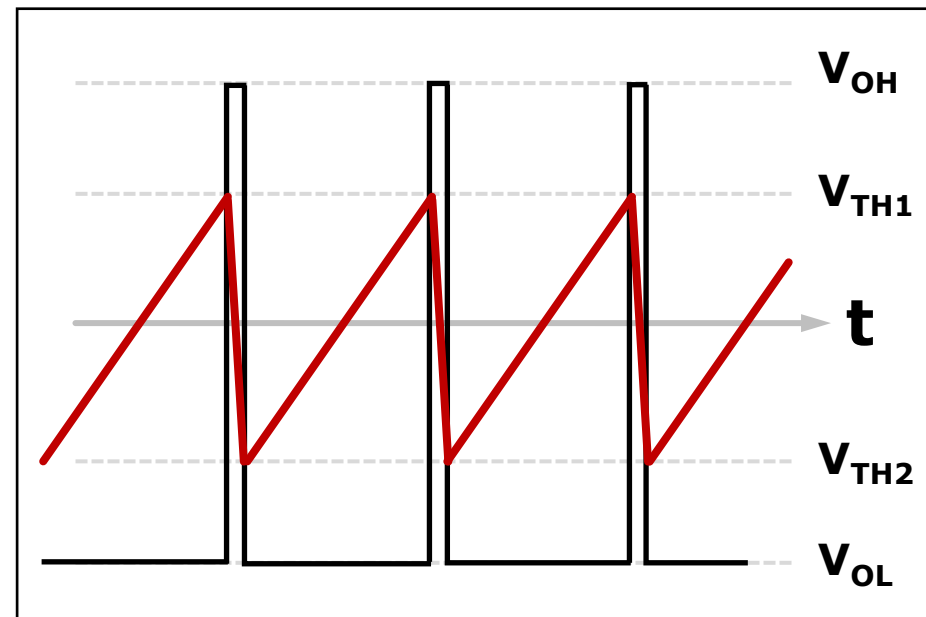
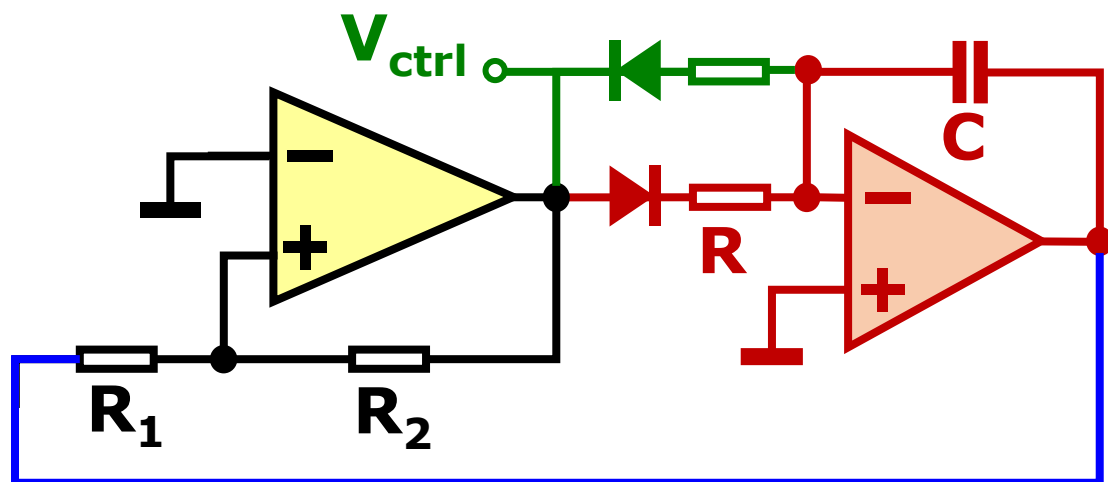
❓ 周期的计算？

- ▶ 双门限 $\pm V_{OM} R_1 / R_2$
- ▶ 积分斜率： $V' = \pm I / C = \pm V_{OM} / RC$
- ▶ $T = 2 \times 2V_{OM} R_1 / R_2 / (V_{OM} / RC)$

❓ 如何输出锯齿波？

- ▶ 两斜坡使用不同时间常数

弛豫振荡：变型：压控振荡



❓ 如何用 V_i 控制 T ?

- ▶ 微小改动, 引入 V_{ctrl} 输入端
- ▶ V_{ctrl} 变化 \rightarrow C 积分速度
- ▶ 控制总的周期

❓ 如何使 T 变化范围较大 ?

- ▶ 较大的 V_i 值域; 较小的 R

