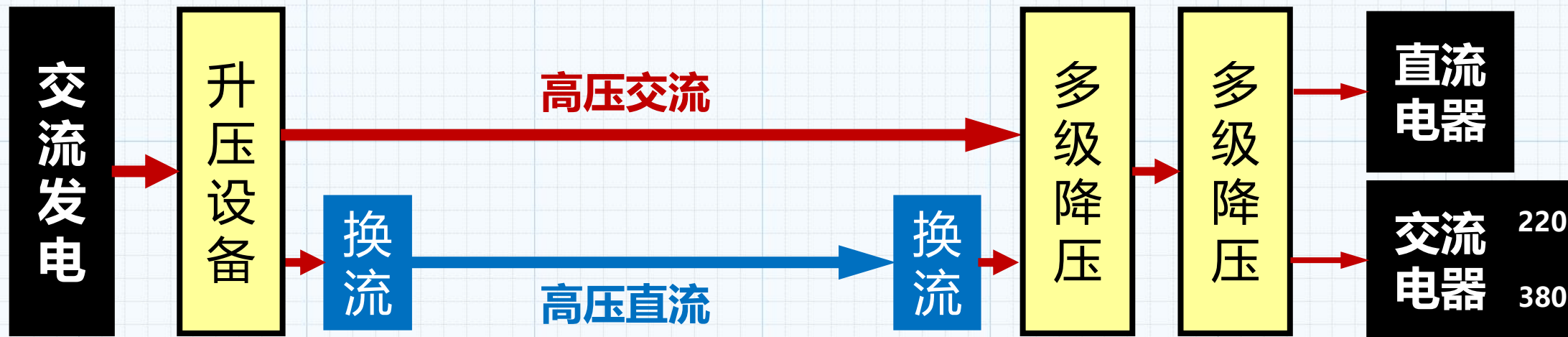




电子线路分析与设计

第 28 讲 稳压电源

☑ 电能传输方案:



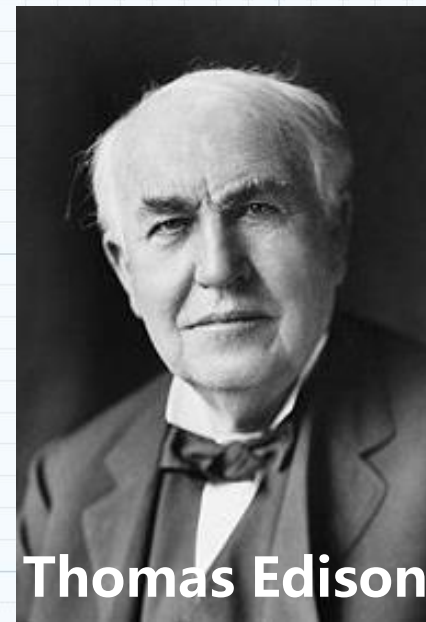
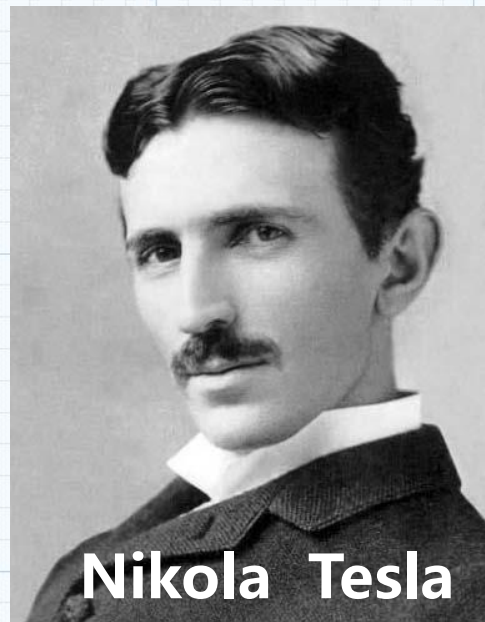
☑ 直流和交流之争

- ▶ 直流: 传输损耗小
- ▶ 交流: 变压方便

☑ 从 直流低压 到 交流高压

☑ 从 交流高压 到 直流高压

☑ 目前输电干网形式: 一升四降



整流

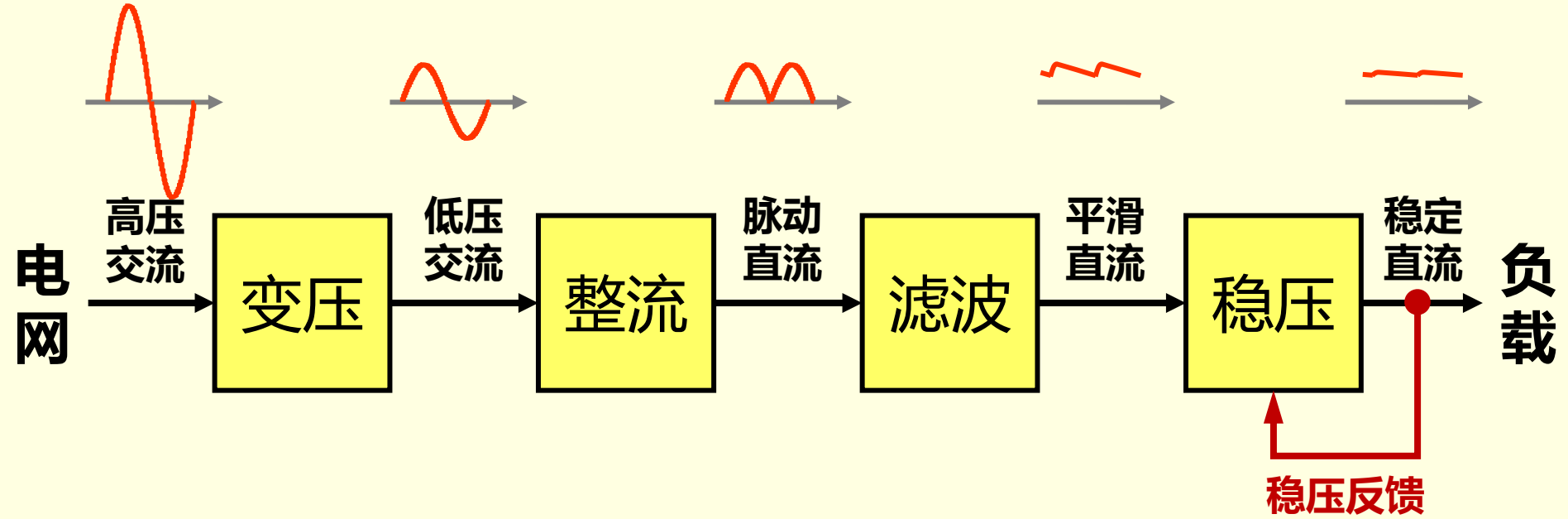
滤波

线性稳压

开关稳压

其它

线性 稳压 电源



整流

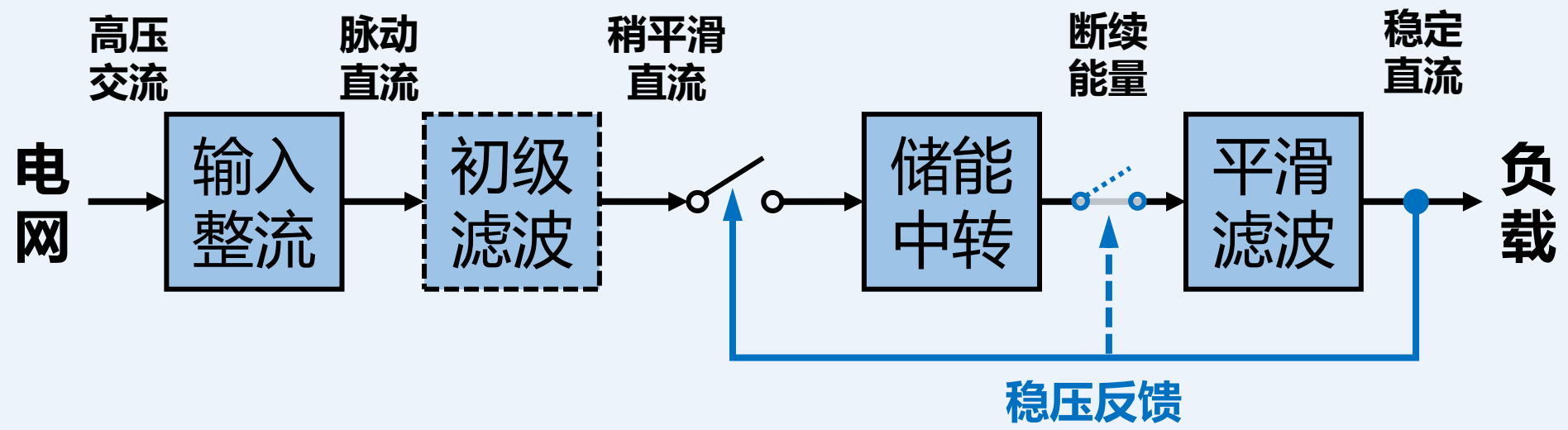
滤波

线性稳压

开关稳压

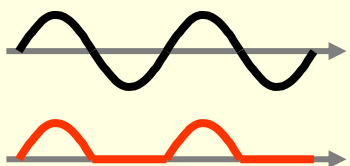
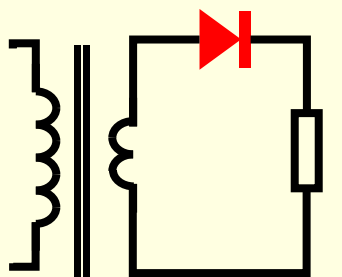
其它

开关 稳压 电源



整流

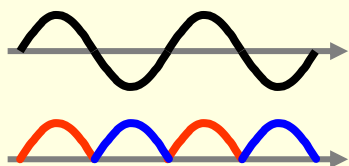
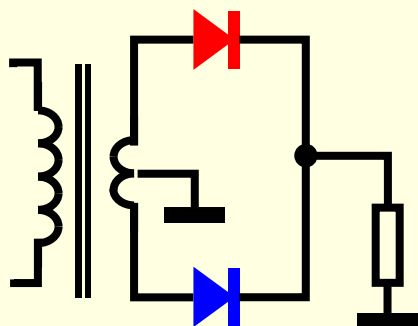
半波整流



- ☺ 1个二极管
- ☹ V_{OAV} 低
- ☹ 脉动严重

性能差

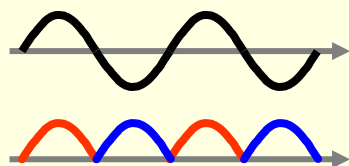
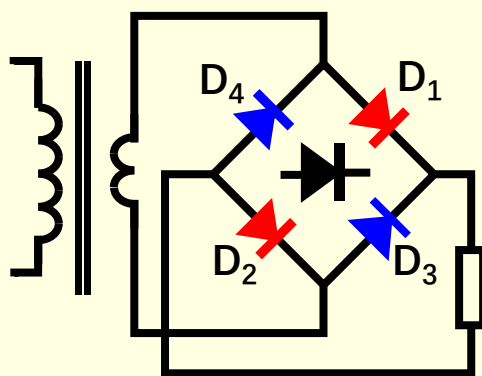
全波整流



- ☹ 2个二极管
- ☹ 线圈需抽头
- ☹ 反向双倍压

线圈大

桥式整流



- ☹ 4个二极管

我们大家都用它

? 整流目的 和 方法 ?

- ▶ 交流电 → 单极性直流电
- ▶ 主流方法: 利用二极管

? 衡量整流效果 ?

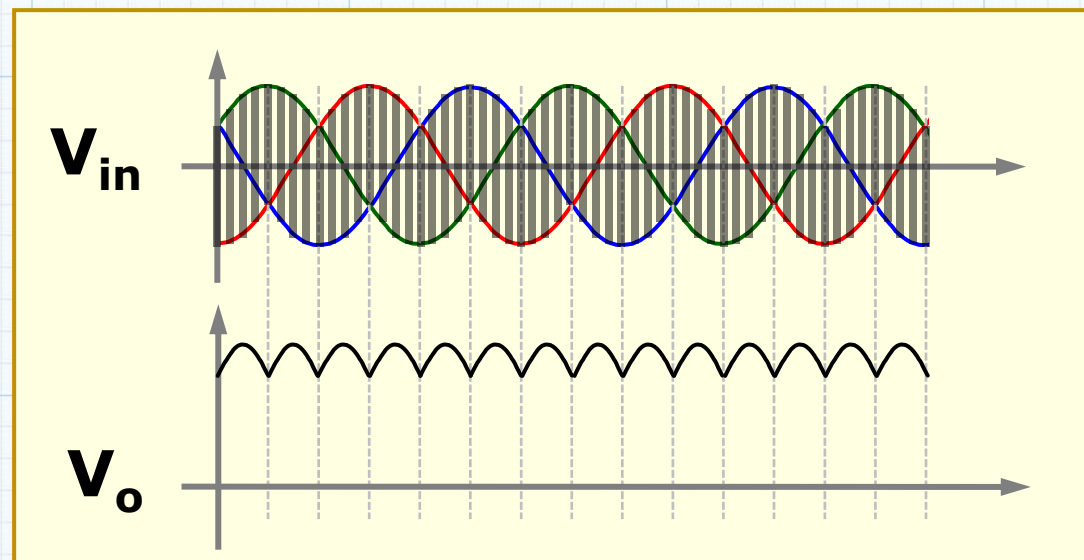
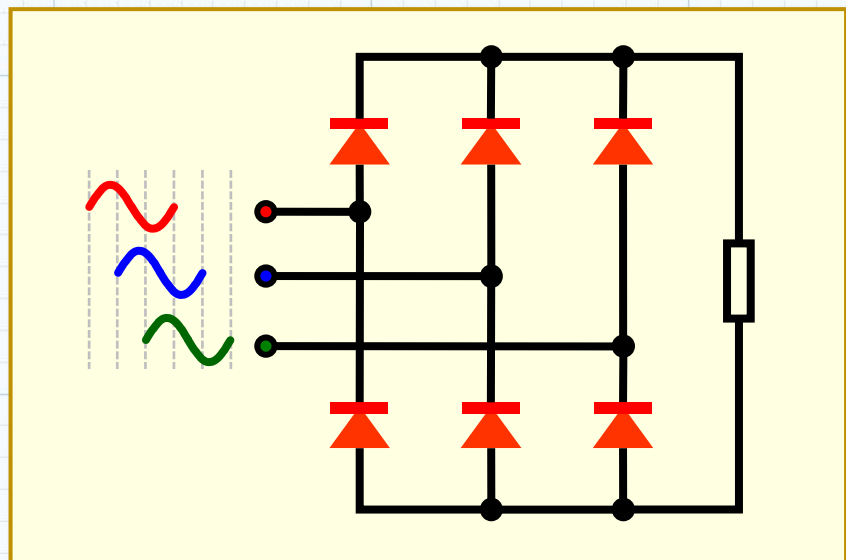
- ▶ 平均输出电压: $V_{O(AV)}$
- ▶ 脉动系数:
$$S = V_{O1M} / V_{O(AV)}$$

? 二极管指标 ?

- ▶ 平均正向电流 I_{AV}
→ 以防过载
- ▶ 最大反向压降 V_{max}
→ 以防击穿

整流：其它

☑ 三相电源整流



☑ 猫须检波器：业余+另类的做法 ...

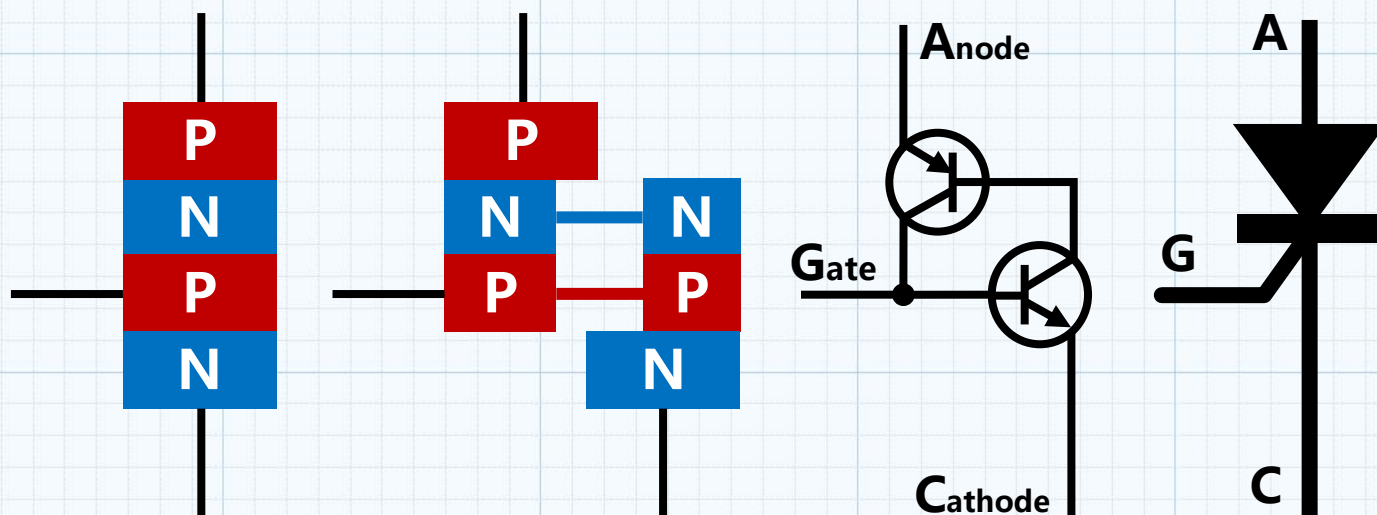
☑ 精密整流：二极管+运放 ← 不适用于电源

☑ 远古电路：同步开关、电动机+发电机...

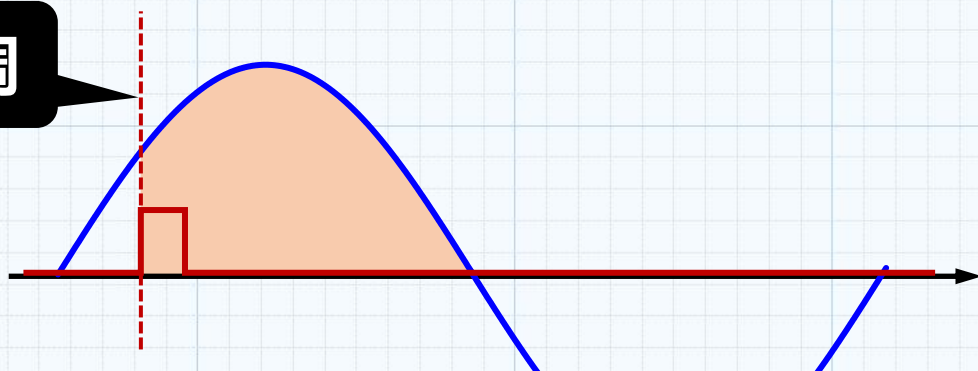


整流：其它

☑ 可控硅整流器 Silicon-Controlled Rectifier



时机可调



相仿的器件：DIAC、TRIAC、Quadrac ...

? 工作原理？

- ① 两管同时导通或截止
- ② 两管均导通时：正反馈！
 - ▶ AC间近似短路
 - ▶ G 极不需电流注入
- ③ 两管均截止的条件：
 - ▶ $V_{AC} < 0$, 或：
 - ▶ 难以维持正向电流
- ④ 截止 变为 导通条件：
 - ▶ V_{AC} 较大, 且：
 - ▶ G极注入启动电流

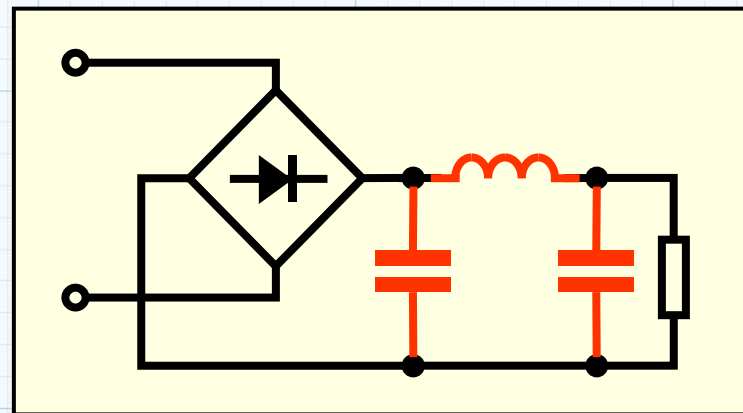
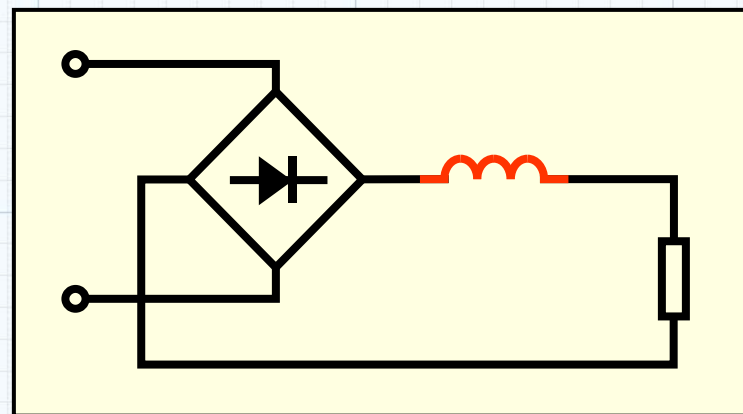
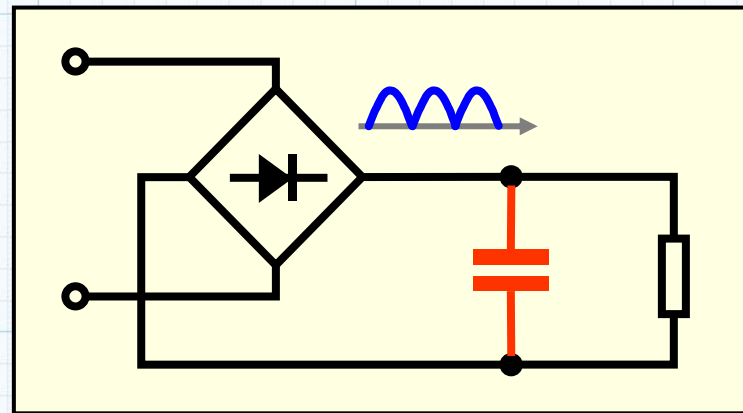
滤波

? 电源滤波 和 信号滤波有区别？

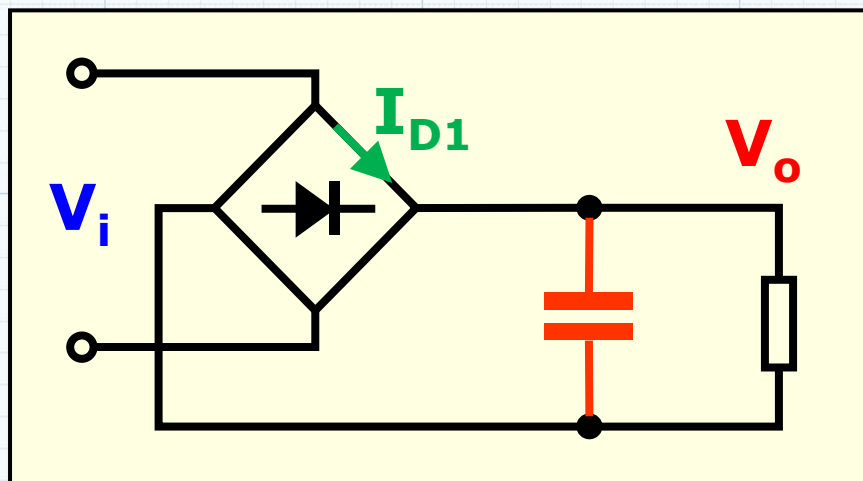
- ✓ 同样构造：C, L 低通
- ✓ 同样意图：保留直流，滤除交流
- ✓ 同样趋势：期望大C/L；高阶更好
- ✗ 无法进行 有源滤波
- ✗ 无法用复阻抗和频响手段分析
 ← 含二极管等非线性元件 ← 相互影响

? 如何衡量效果？有何分析难点？

- ✓ 平均输出电压： V_{OAV}
- ✓ 外部特性： $V_{OAV} \sim I_{OAV}$
- ✓ 难点：二极管导通时段 ← 滤波的影响

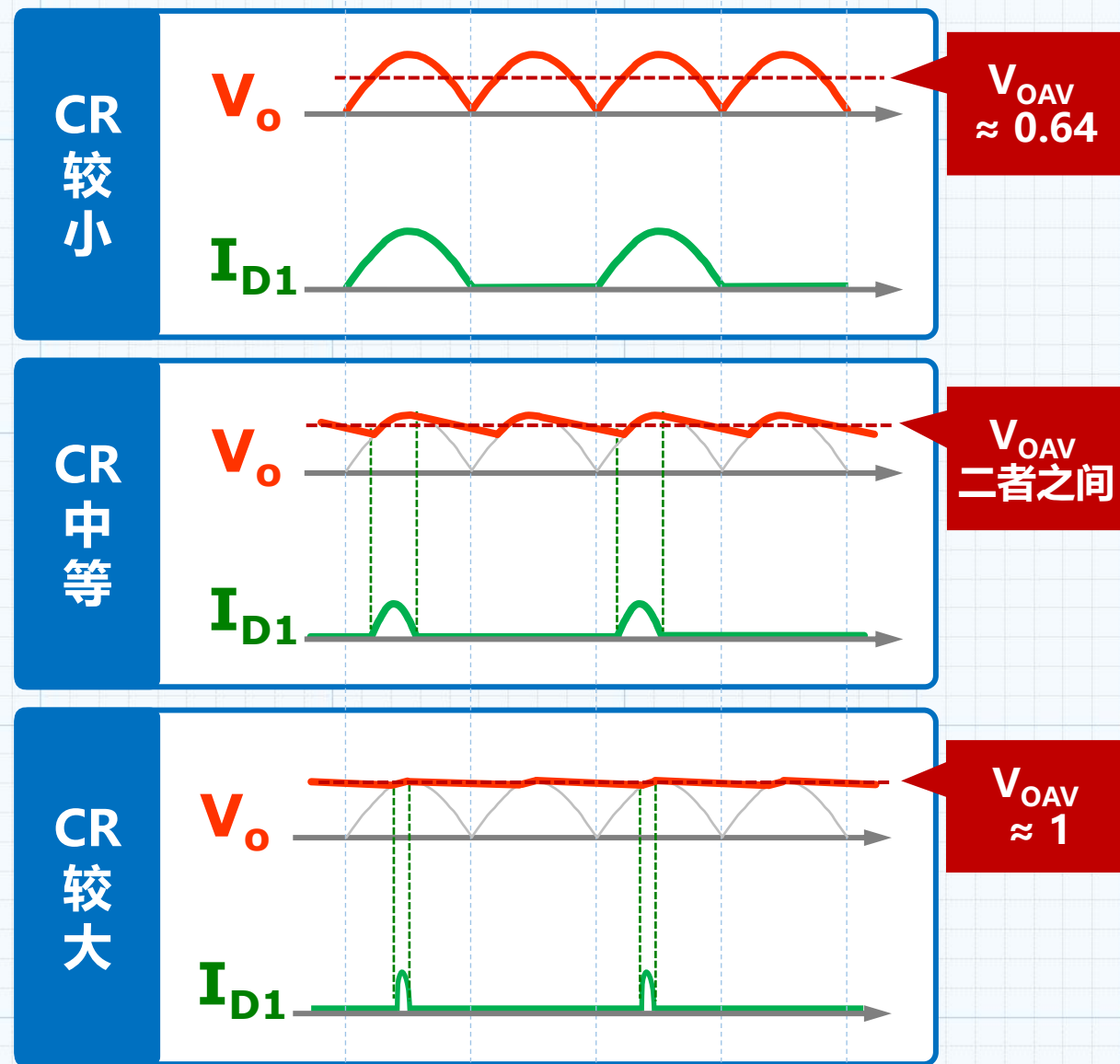


滤波：电容滤波

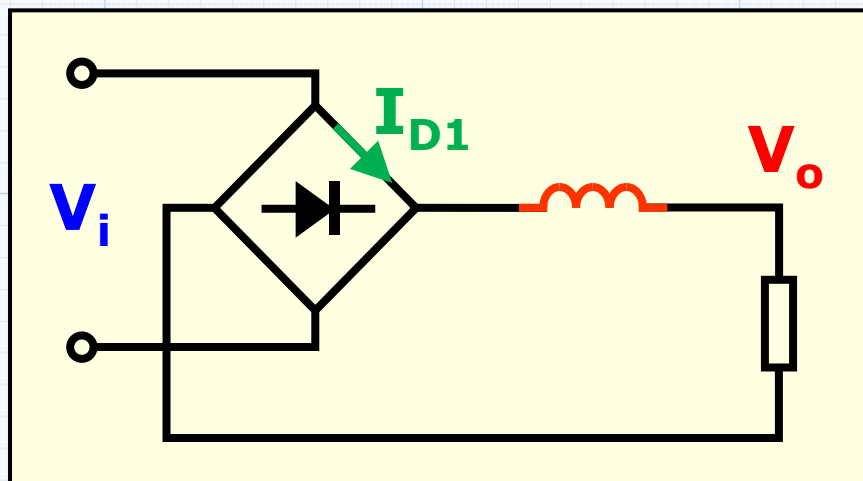


? 电容滤波效果？

- ▶ CR 越小 \rightarrow 波纹越大
- ▶ CR 越小 $\rightarrow V_{OAV}$ 越小
- ▶ CR 越大 \rightarrow 二极管导通越短
- ☑ 电容滤波适用于 R 较大场景
- ☑ 一般取 $CR > 1.5T = 30ms$

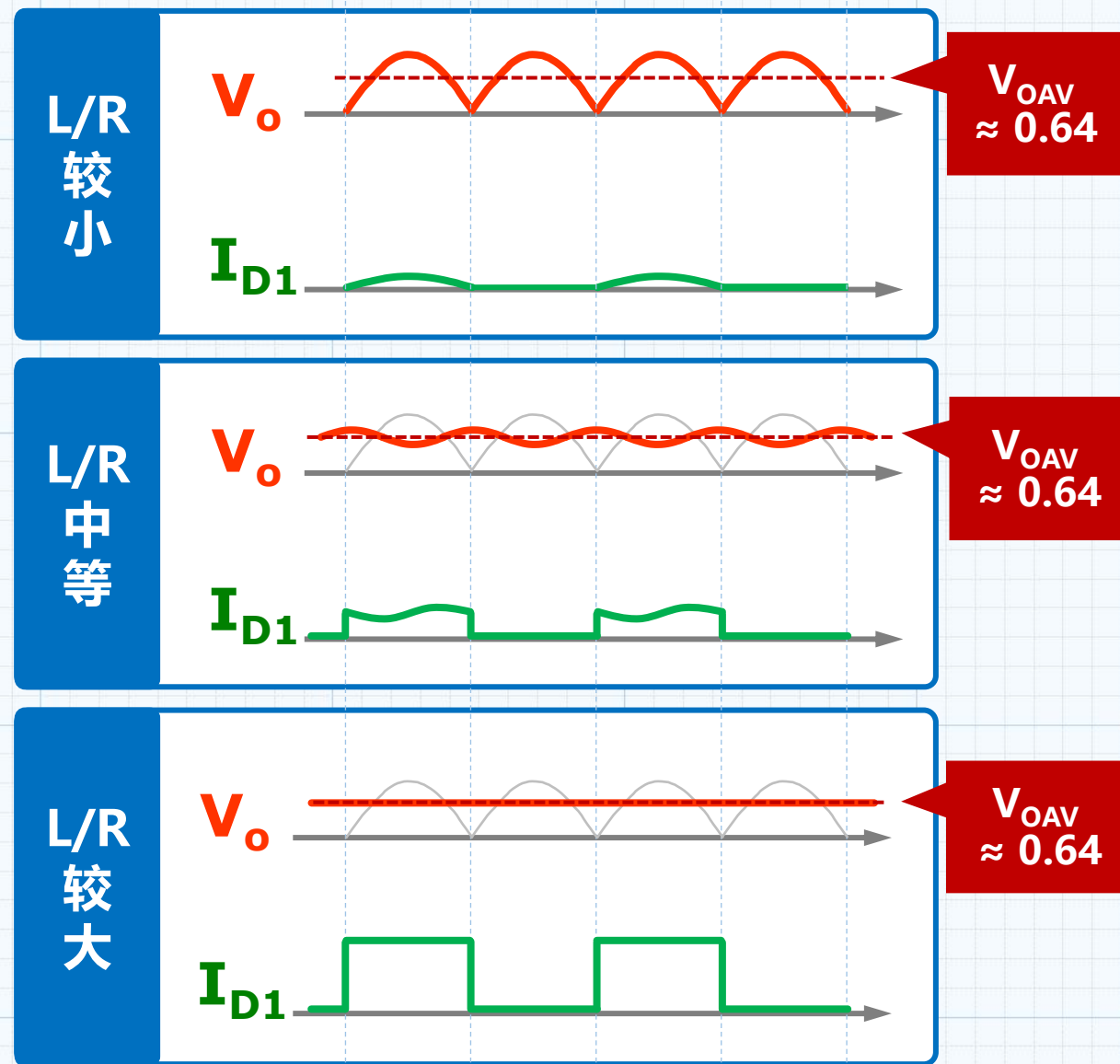


滤波：电感滤波



? 电感滤波效果？

- ▶ L/R 越小 \rightarrow 波纹越大
- ▶ 但 V_{OAV} 几乎保持不变
- ▶ 二极管导通时段几乎不变
- ▶ 估算时可用复阻抗分析
- ☑ 相对适用于 R 较小的场景



滤波

线性稳压

开关稳压

其它

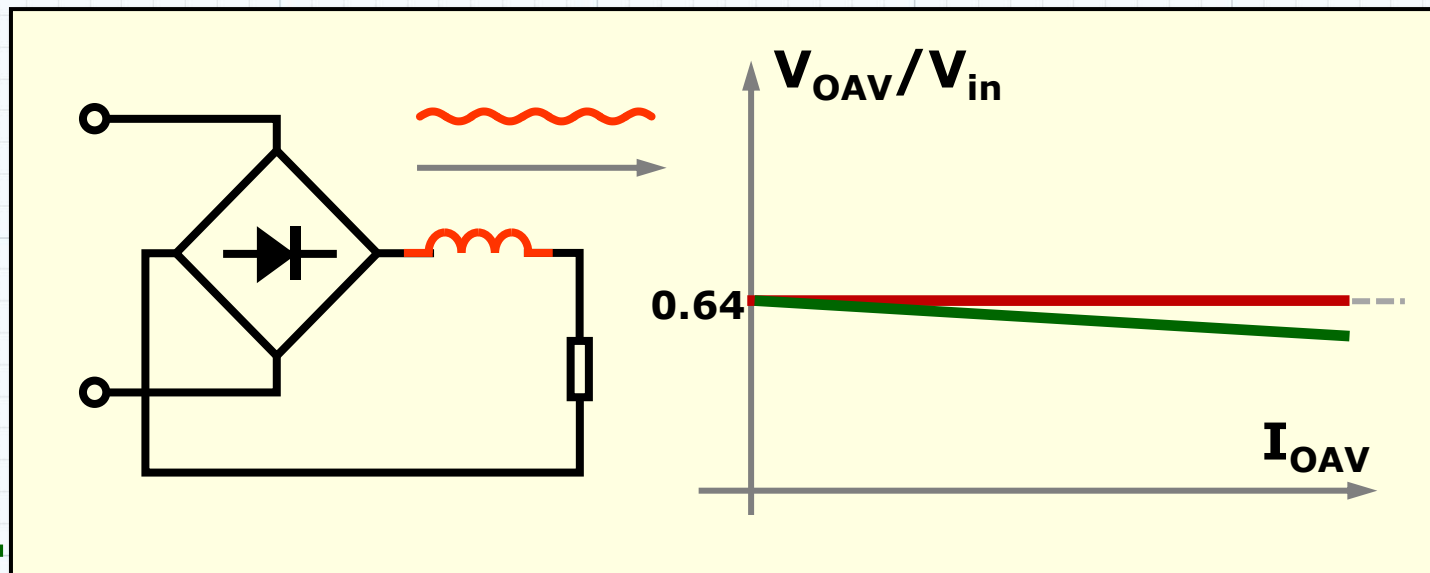
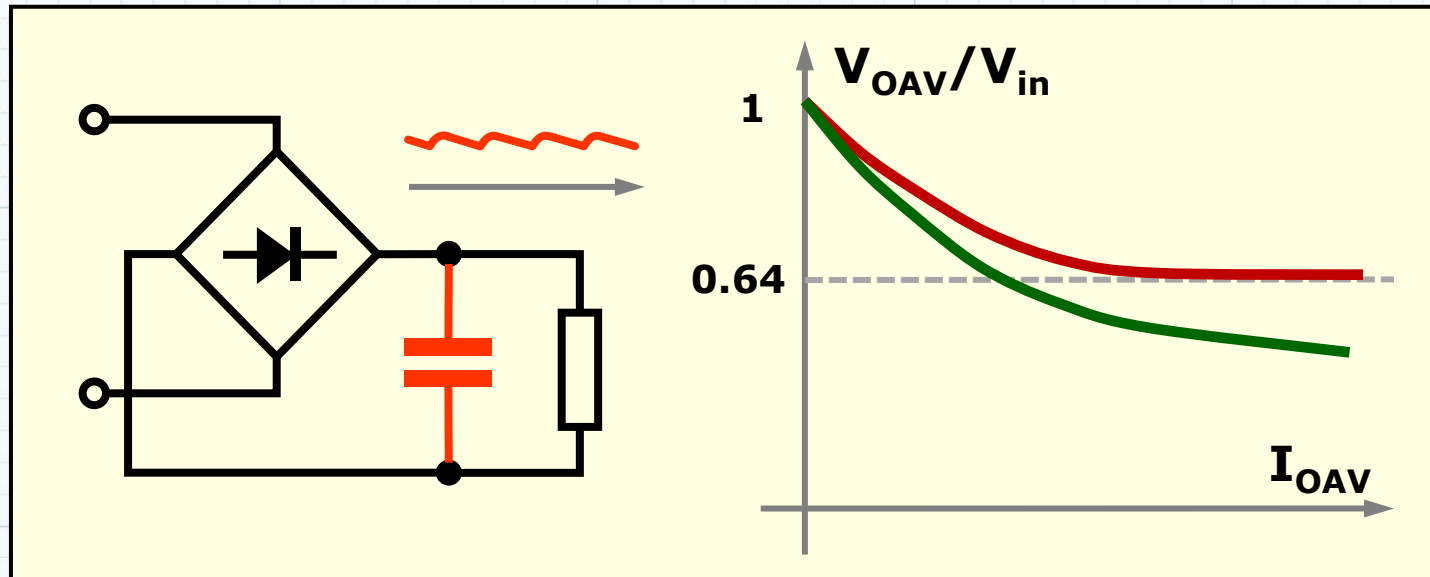
滤波：外部特性

? 外特性的定义？

- ▶ 线性源： $V_o \sim I_o$
- ▶ 线性源： $R_o \leftarrow$ 戴维南
- ▶ 整流加滤波：非线性
- ▶ 定义： $V_{OAV} \sim I_{OAV}$
- ▶ \leftarrow 波纹随负载变化

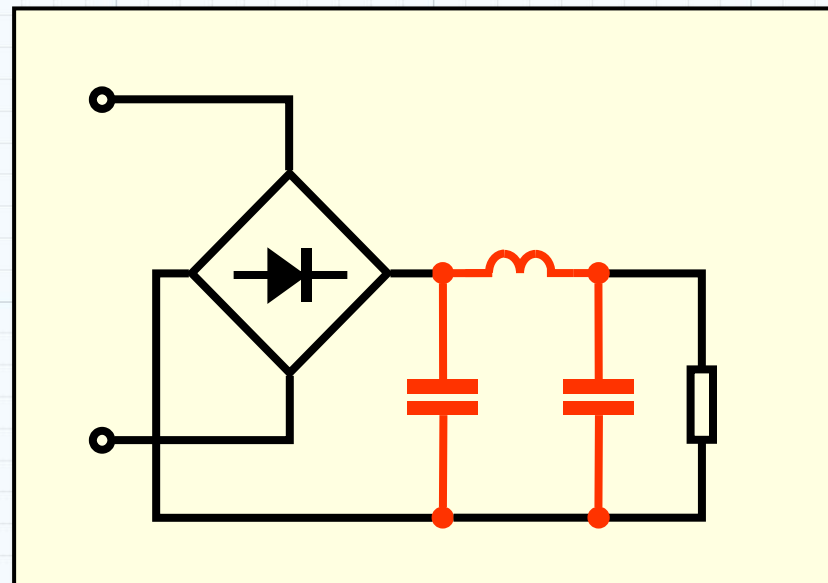
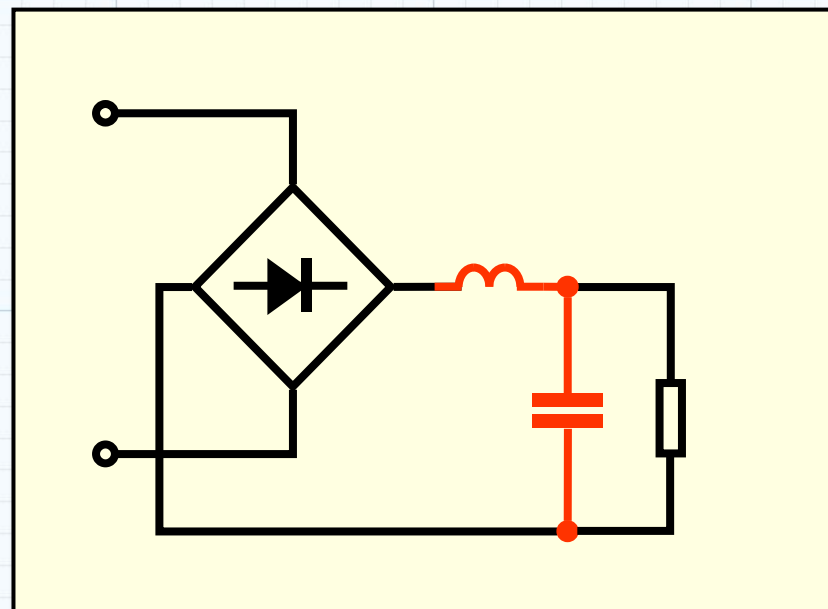
? C 滤波 vs L 滤波？

- ▶ C：外特性 **软**
- ▶ L：外特性 **硬**
- ▶ 原因：C空载时 $V_{OAV} \uparrow$
- ▶ 若变压器和 D 有内阻 ...



滤波：其它

- ❗ 电源滤波也可以采用高阶滤波
 - ▶ LC滤波, LC- π 滤波, RC- π 滤波..
 - ▶ 均为低通形式
 - ▶ 一般不采用很高阶数 ← 还有后级稳压
- ❗ 外特性：与一阶滤波情形相似
 - ▶ 第一级用C：平均输出电压略高
 - 但输出特性比较软
 - + 且二极管导通角比较小
 - ▶ 第一级用L：输出特性硬朗
 - 但平均输出电压较低
 - + 二极管导通角几乎总为180



稳压：稳压二极管

❗ 工作于击穿区 → 稳定的反偏电压

- ▶ 噪声大、衰老、温差影响大
- ▶ 温度系数：数百 ~ 数十 ppm/°C

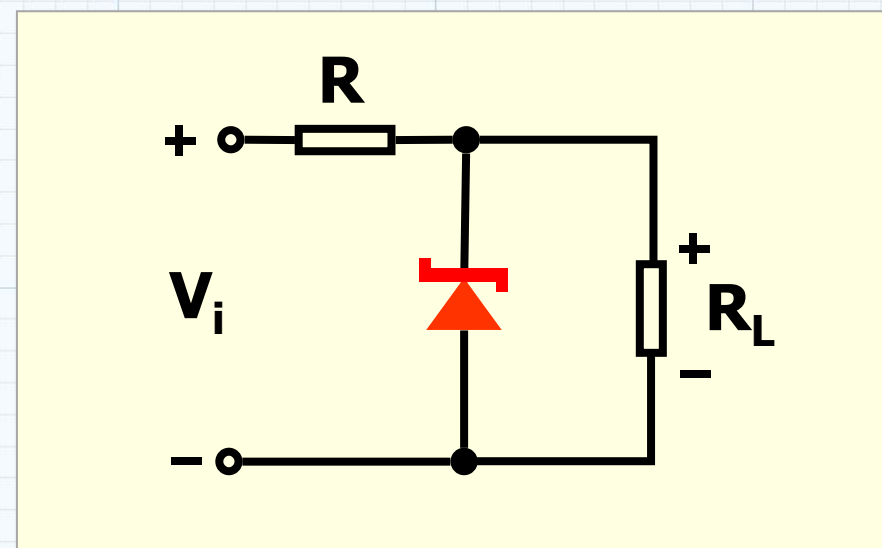
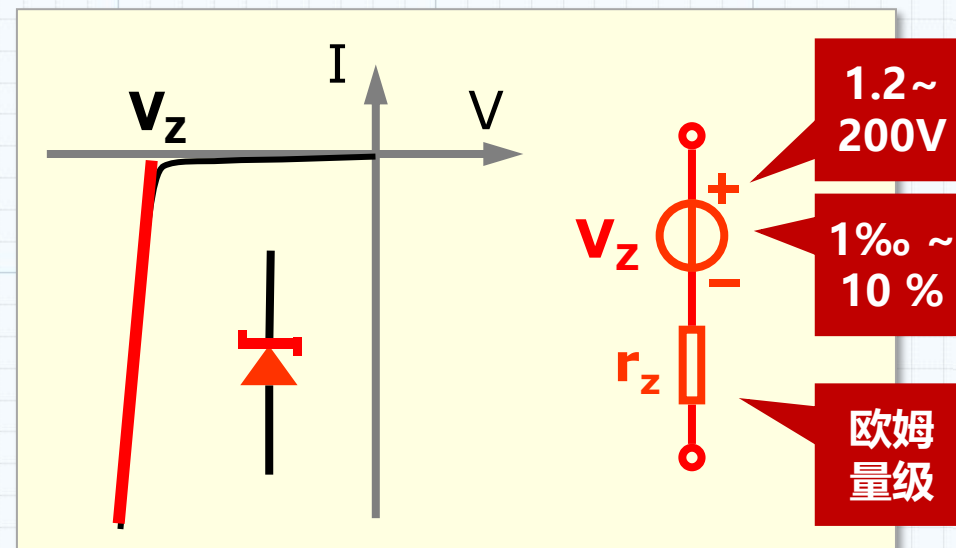
❗ 二极管稳压电路

- ▶ V_i 变化时：R 承担变化量
- ▶ R_L 变化时： D_z 承担变化量
- ▶ 输出电阻：等效电路..
- ▶ 稳压系数：

$$\frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i / V_i} = \frac{r_z}{R} \cdot \frac{V_i}{V_z}$$

❗ 典型问题：R 的选择

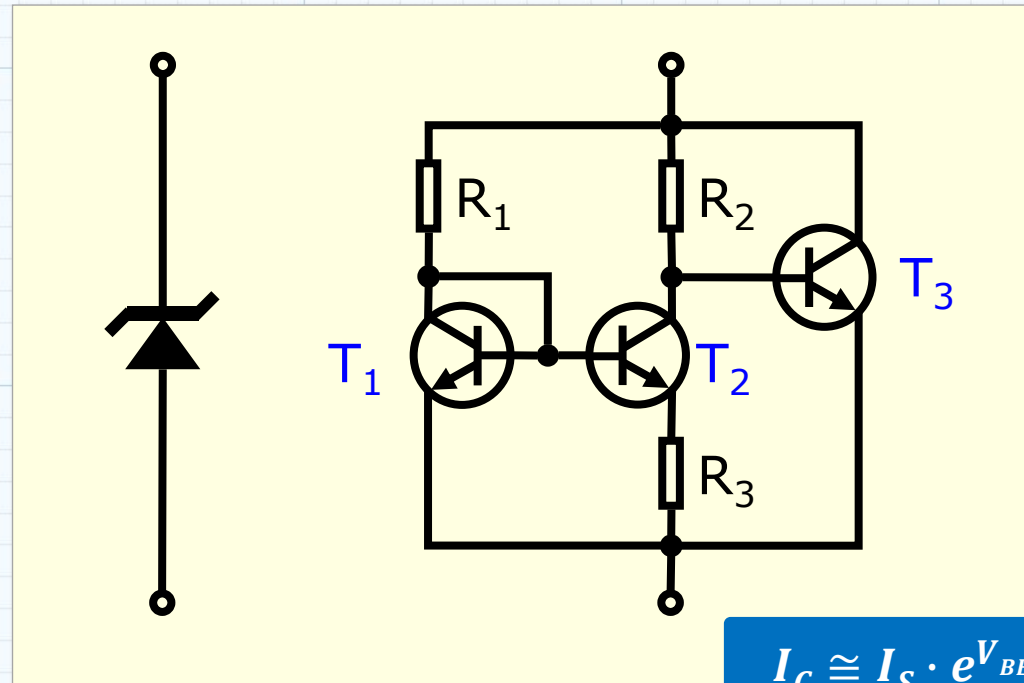
- ▶ 由 I_z 、 V_i 、 R_L 的上下限列不等式...



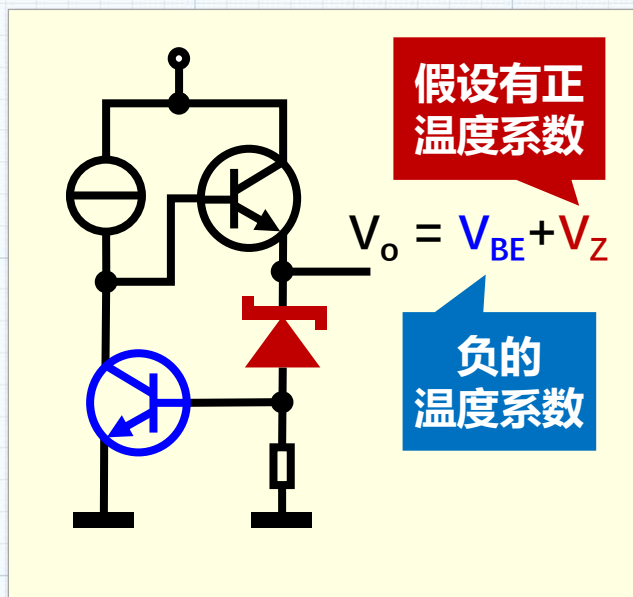
稳压：能带间隙电压参照

！ 引入目的

- ▶ 构造类似稳压管的二端电路
- ▶ 不击穿 → 噪声小，寿命长
- ▶ 输出电阻尽可能小
- ▶ 温度系数小 ← 温度系数抵消



$$I_C \cong I_S \cdot e^{V_{BE}/VT}$$



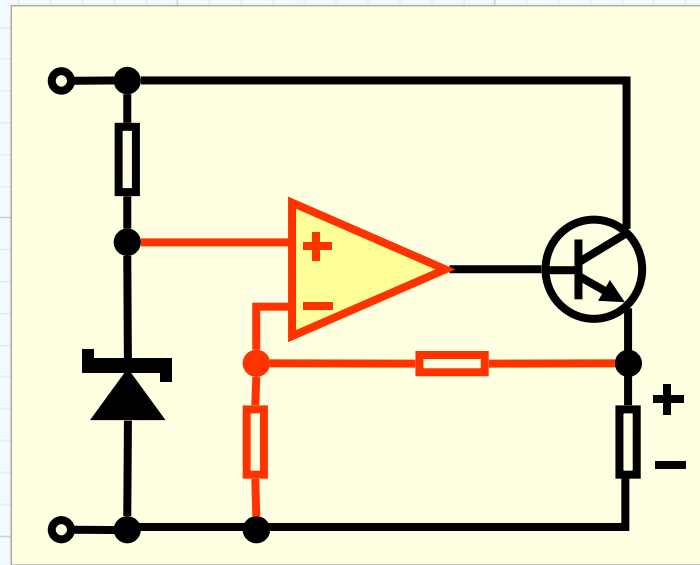
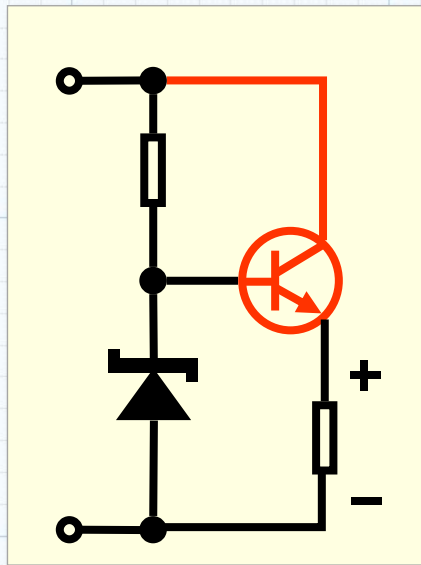
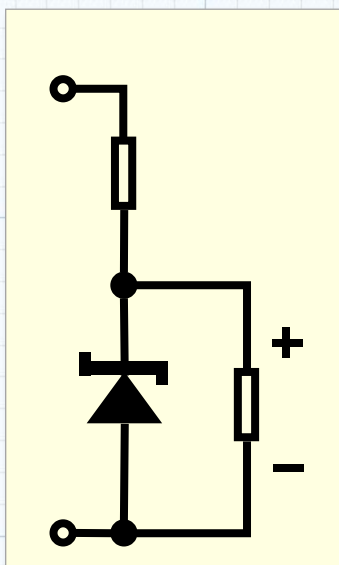
！ 电路设计与计算

- ▶ $V_{\text{端压}} = V_{BE3} + R_2 I_{C2}$
- ▶ V_{BE3} 有负温度系数: $1.205 + \alpha T$
- ▶ $R_2 I_{C2}$ 有正温度系数: $R_2 V_T / R_3 \cdot \ln(R_2 / R_1)$
- ▶ 输出 1.205V 时，几乎无温度系数
- ▶ 电流变化 → T_3 旁路 → 内阻很小

$$\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \cong e^{\frac{V_{BE1} - V_{BE2}}{V_T}} \approx e^{\frac{I_{C2} R_3}{V_T}}$$

kT/q

稳压：稳压电路的改进



☑ **D_z 或带隙电压：不可调，带负载能力差，甚至 P_i 较大**

☑ **改进1：增加跟随器，提高带负载能力**

‣ 减小 R_o ；减小击穿电流 → 降低功耗 + 更稳定

☑ **改进2：引入电压负反馈**

‣ 进一步减小 R_o

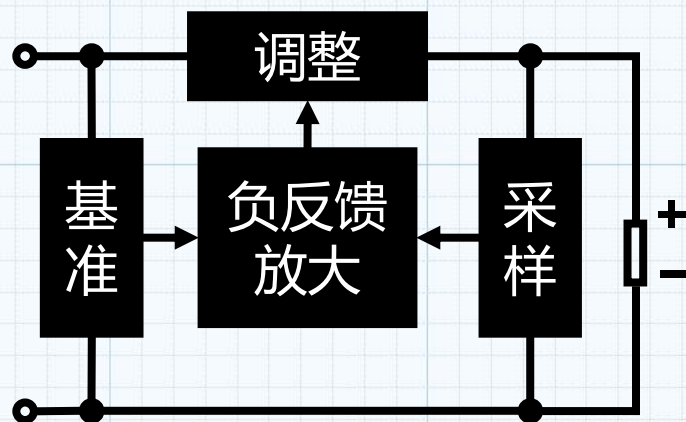
‣ 调节反馈电阻 → 可调输出

❓ 能否使用其它组态？

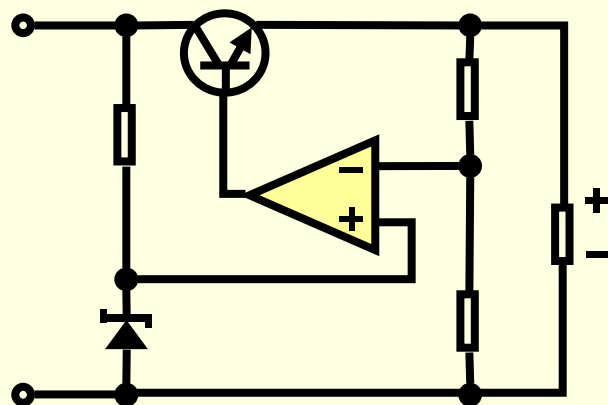
❓ 能否使用其它反馈组态？

❓ 此时 BJT 能否使用其它组态？

稳压：线性稳压电路



串联型线性稳压



? 优点与缺点?

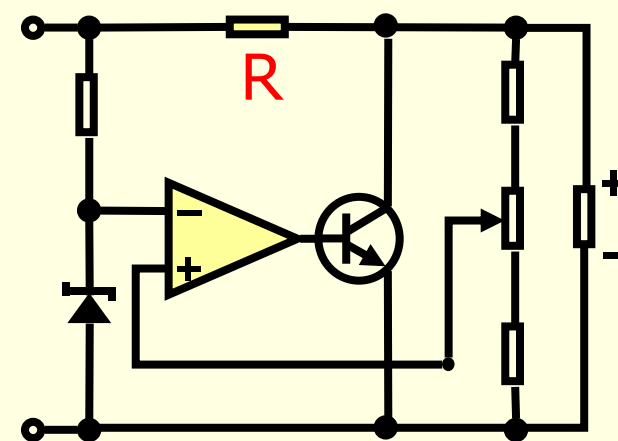
- ✓ 结构简单; 调整方便
- ✓ 输出脉动小
- ✗ 效率低: 20~40%
- ✗ 调整管功耗大 ← 散热

✓ 线性稳压电源：调整管工作于线性区

✓ 采用电压负反馈：稳定 V_o 、减小 R_o 。

✓ 也有并联型线性稳压：

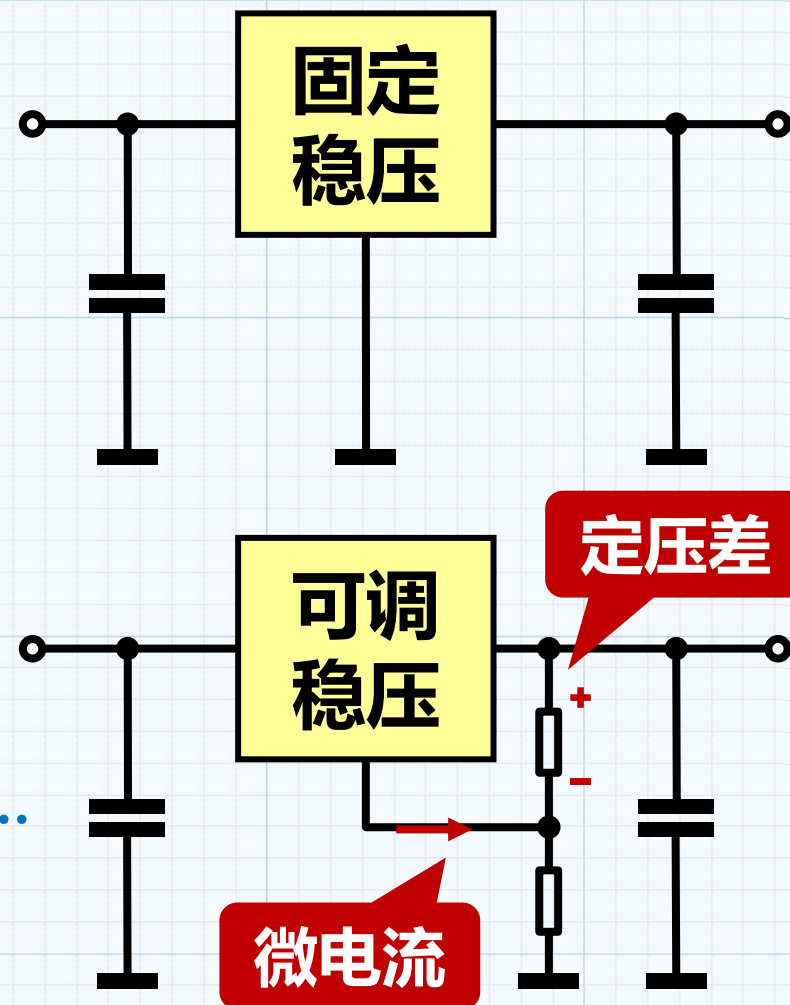
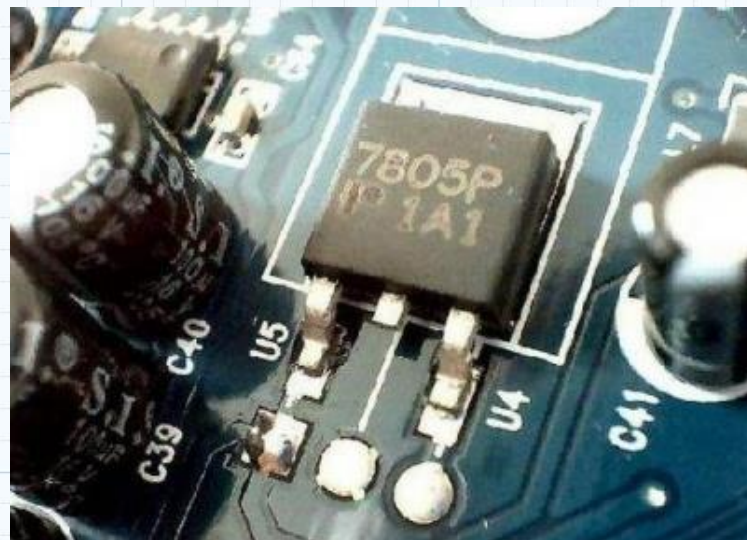
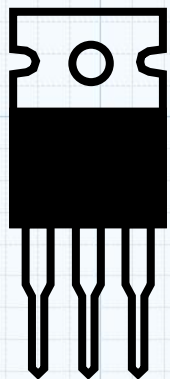
- ▶ 本质：电压串联负反馈+CE组态
- ▶ 优点：经过 R_L 的电流并不经过调整管
- ▶ 缺点： R_o 较大；轻负载反而 I_C 很大



并联型线性稳压

稳压：集成线性稳压电路

价格 < 0.1



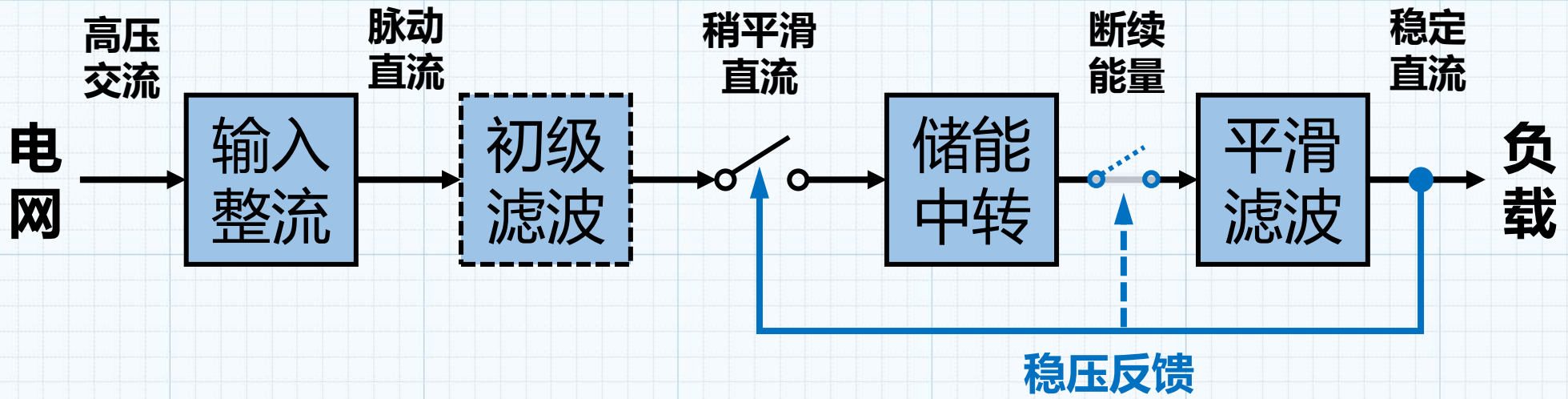
线性稳压

开关稳压

其它

- ✓ **特点：** 体积、可靠性、温漂、价格、简便...
- ✓ **结构：** 启动+基准+采样+比较+调整
- ✓ **保护：** 限流、过热、过压...
- ✓ **应用：** 固定输出型：极简单；可调输出型：很简单
- ✓ **线性电路中大量运用，但需注意效率问题**

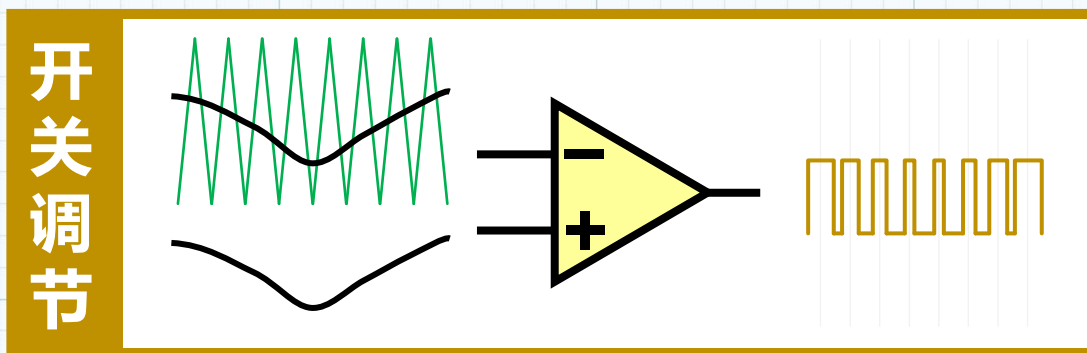
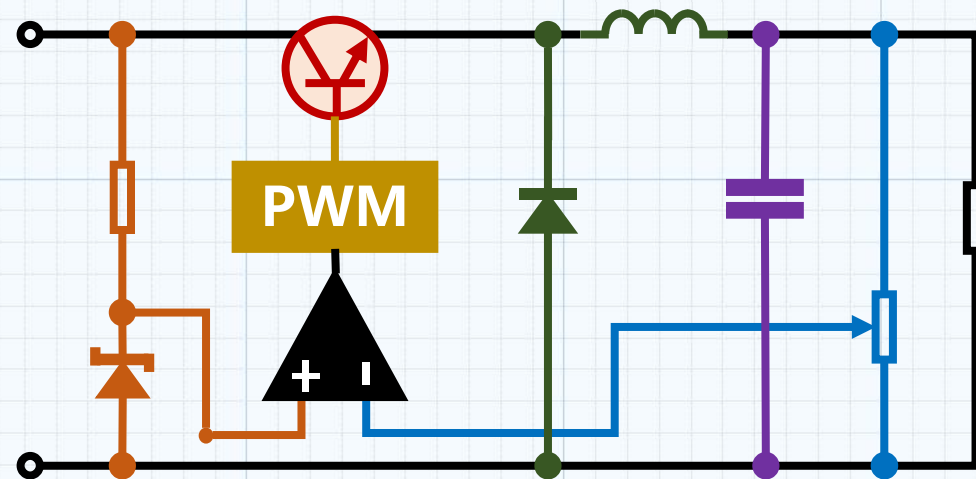
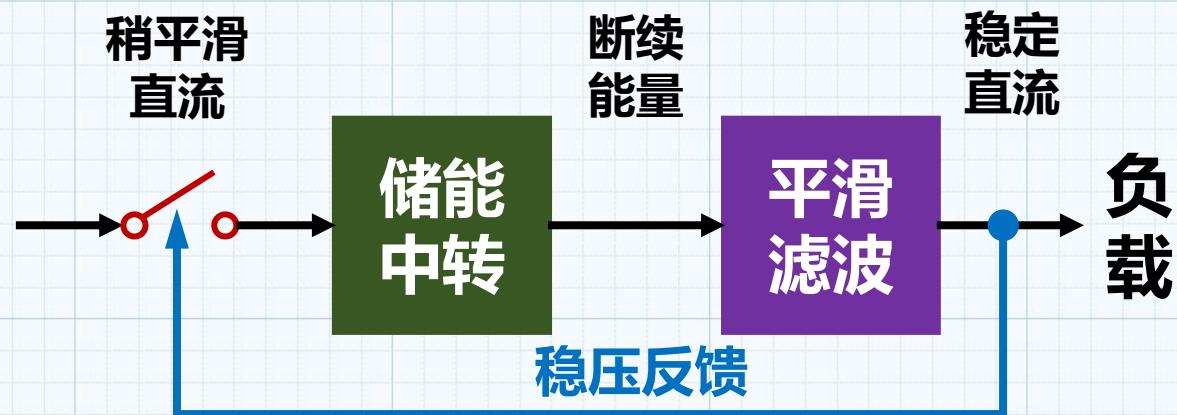
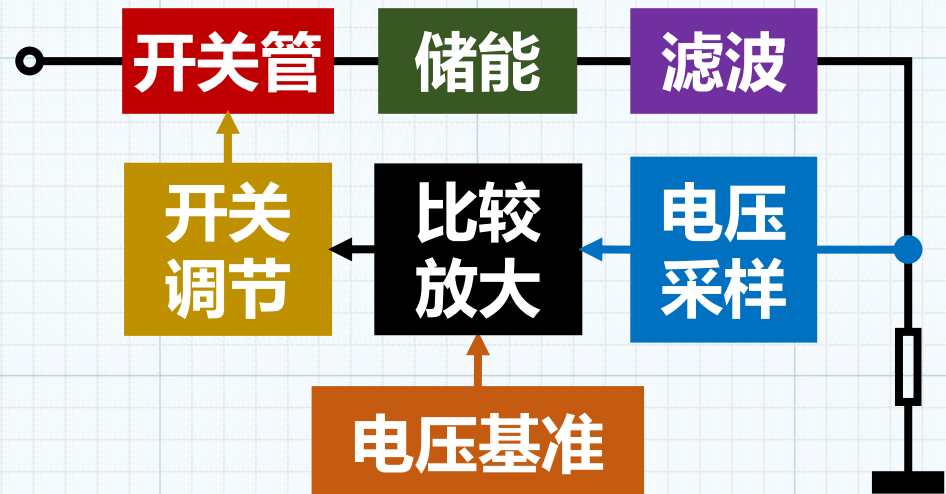
开关稳压电源



? 分类方法

- ▶ 储能器件: 电感 | 电容 (电荷泵)
- ▶ 开关位置: 串联 | 并联
- ▶ 开关数量: 一个 | 多个
- ▶ 输出电压: 降压 | 升压 | 反压
- ▶ 集成程度: 分离 | 集成 | 混合
- ▶ 其它特点: 可调 | 多路 | 隔离 ...

	线性稳压	开关稳压	
		电感	电荷泵
效率	20-60%	90-95%	75-90%
波纹	很低	低	中等
EMI噪声	非常低	中等	较低
PCB面积	较小?	最大	中等
价格	高? 低?	高?	中等



开关管 BJT: 饱和 | 截止 → 低功耗

储能 L: 开关导通时充能, 否则放能

D: 为 L 放能提供回路: 续流

滤波 C: 配合负载, 平滑滤波

采样 稳压负反馈 → 电压采样

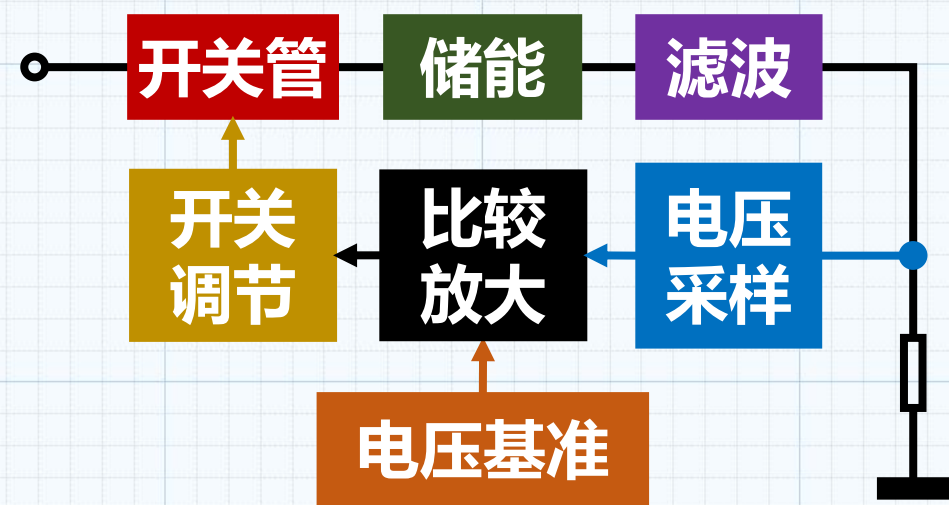
V_{REF} 提供不依赖于环境的参考电压

差放 将采样电压与电压基准做比较

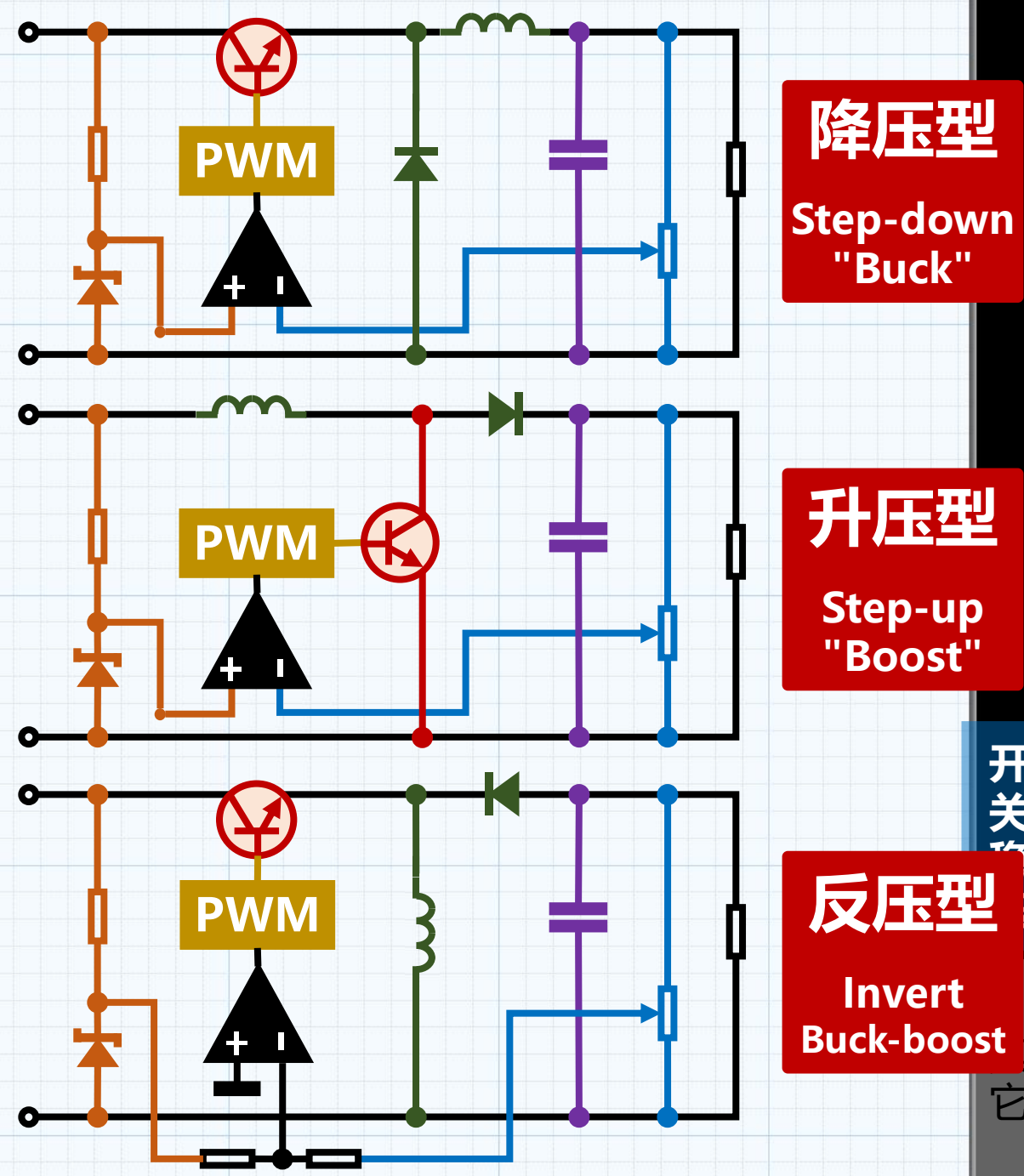
整流

滤波

线性稳压

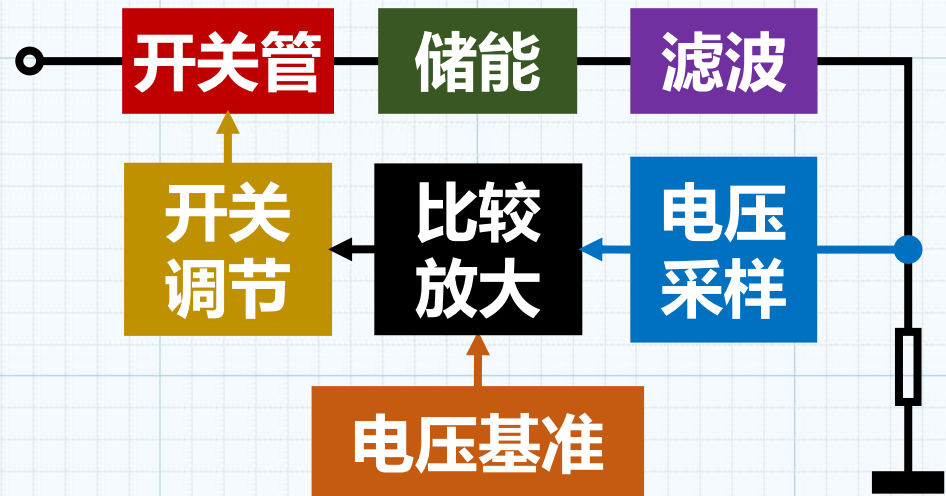


- 开关管** BJT: 饱和 | 截止 → 低功耗
- 储能** L: 开关导通时充能, 否则放能
D: 为 L 放能提供回路: 续流
- 滤波** C: 配合负载, 平滑滤波
- 采样** 稳压负反馈 → 电压采样
- V_{REF}** 提供不依赖于环境的参考电压
- 差放** 将采样电压与电压基准做比较



开关稳压

它

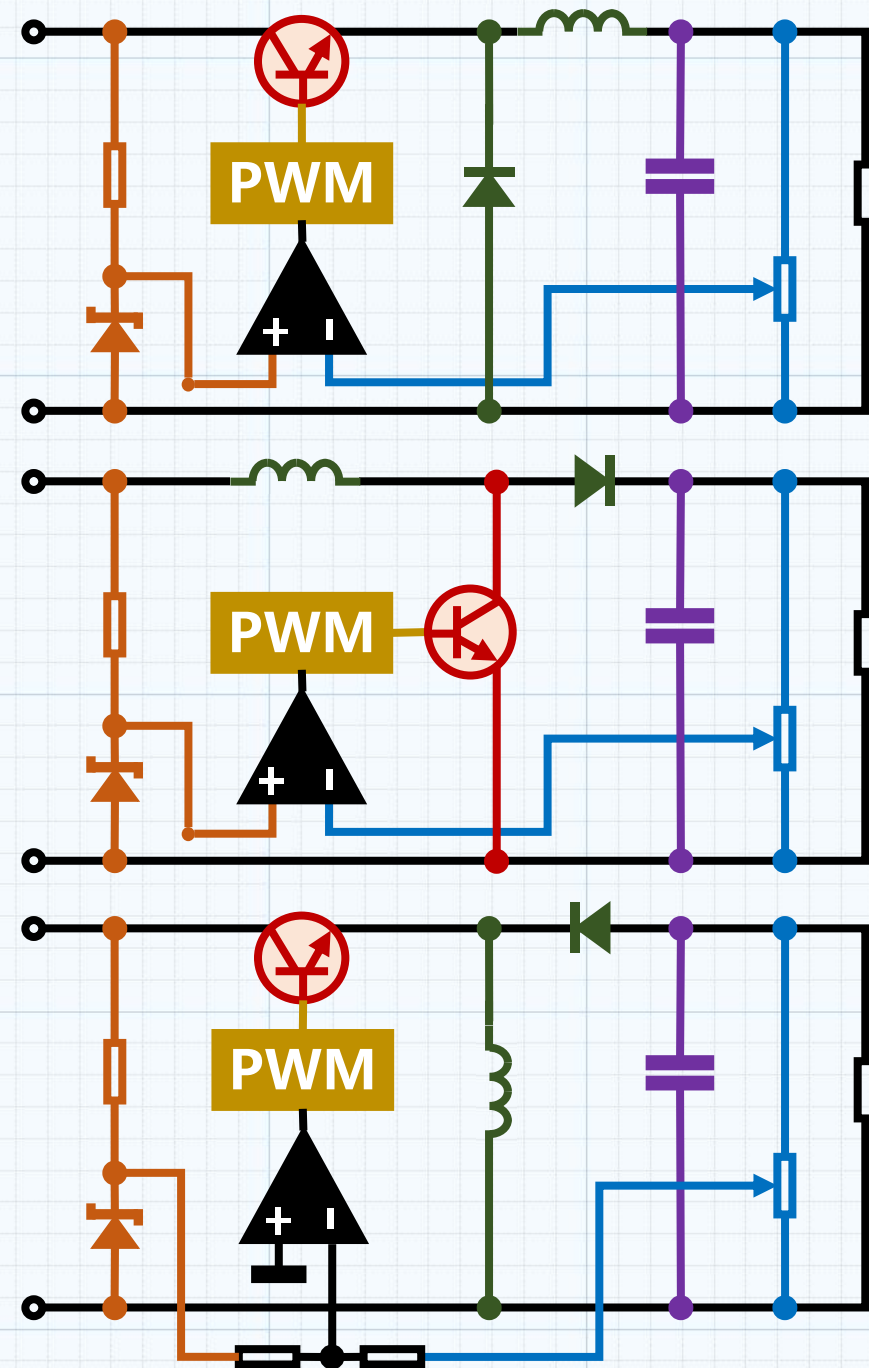


! 优点

- ▶ **效率高**: 没有高内耗器件
- ▶ **体积小重量轻**: 无需变压器和大C
- ▶ **输入源要求低**: 宽广输入电压范围
- ▶ **间接影响**: 功率密度高; 热稳定好

! 缺点: 开关不停翻转

- ▶ **纹波大; EMI辐射、噪声大**
- ▶ **启停时间略长; 调节起来略慢**



降压型
Step-down
"Buck"

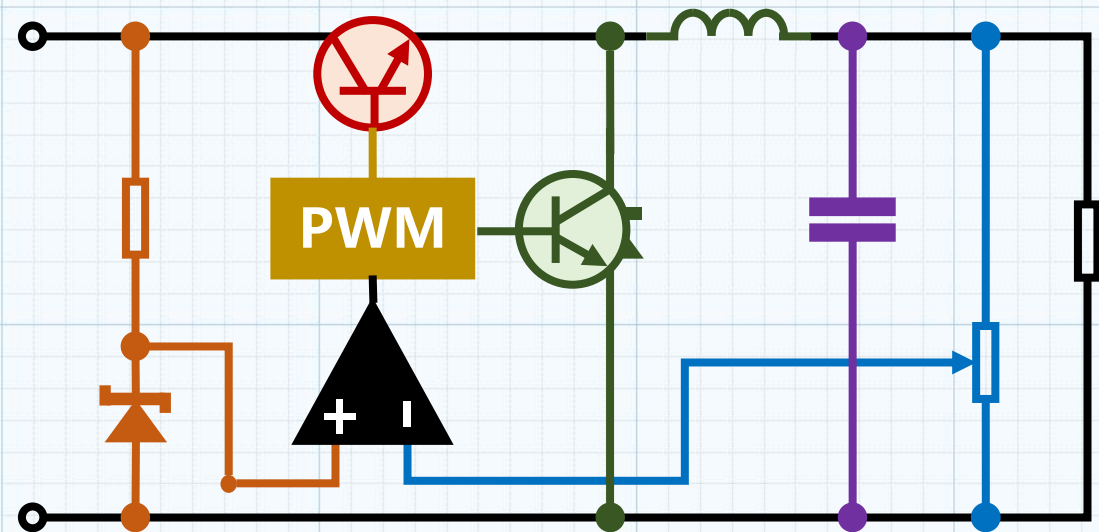
升压型
Step-up
"Boost"

反压型
Invert
Buck-boost

其它变化

☑ 二极管替换为“辅助开关管”

- ▶ → 同步开关电路
- ▶ 需要相反的开关控制信号
- ▶ 但效率更高：省去 D 功耗

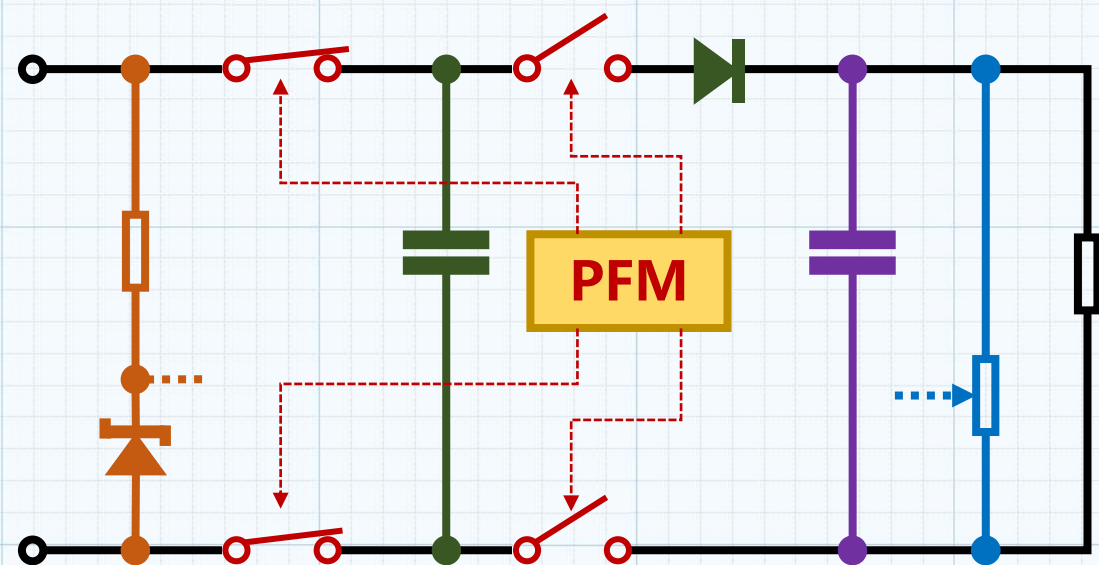


☑ 逆变后可经变压器耦合负载

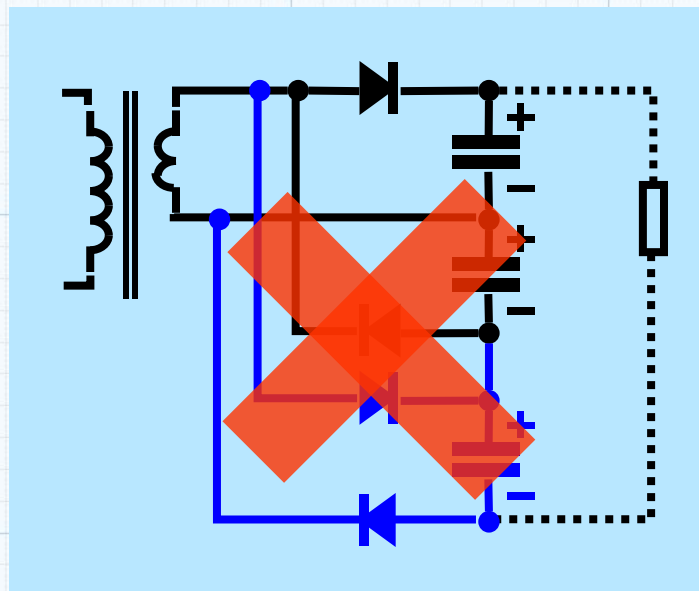
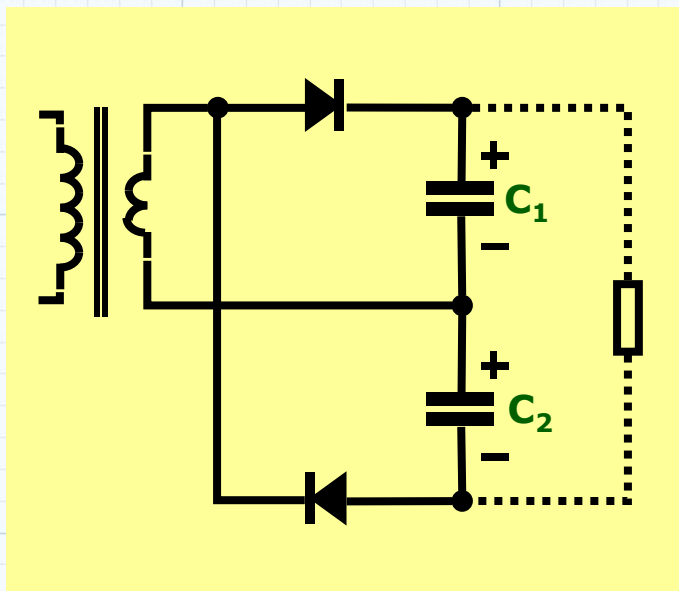
- ▶ → 隔离电源
- ▶ 采样信号需隔离反馈（如光耦）

☑ 电感替换为电容 → 电荷泵

- ▶ PWM → PFM
- ▶ 无 L → 更小巧；多开关 → 灵活
- ▶ 更适合纯集成电路
- ▶ 缺点：输出电流能力较低



其它：倍压整流



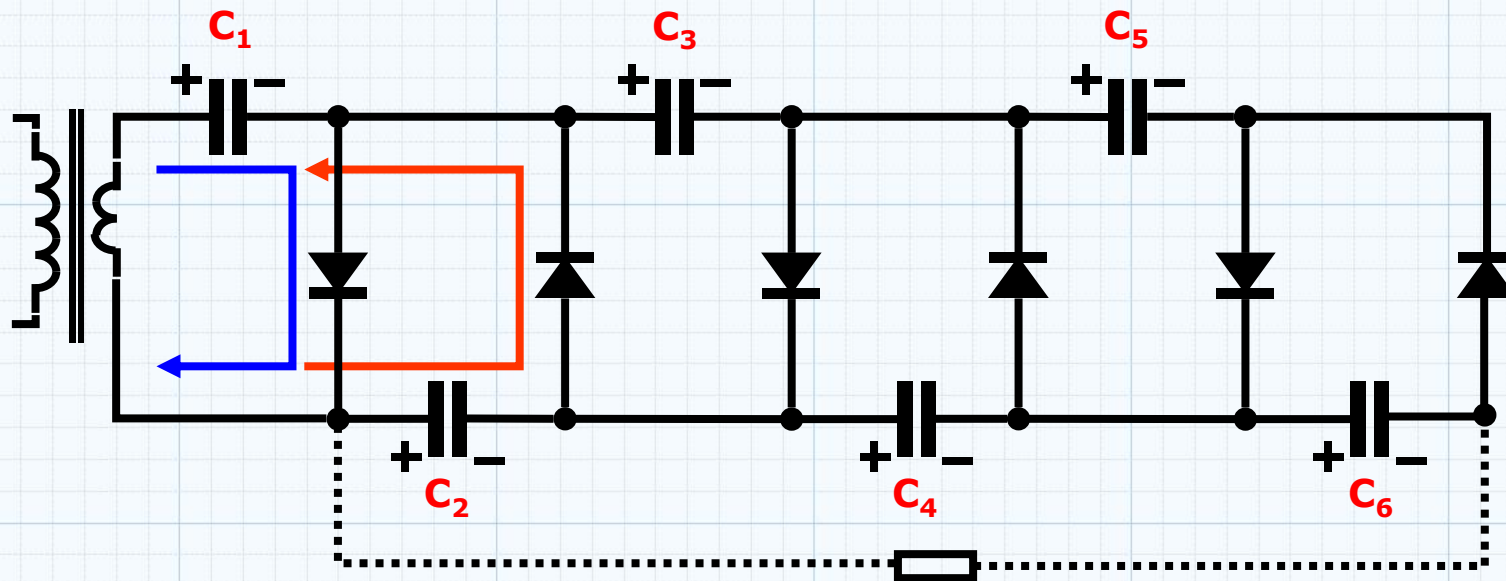
☑ 本质

- ▶ 每个二极管为对应的电容单极性充电
- ▶ 而电容一般同向串联

☑ 工作过程：半周 C_1 充电...半周 C_2 充电...

☑ 是否可以靠堆积直接构成多倍压？

其它：多倍压整流



- ✓ **目的：**整流 + 多倍压
- ✓ **特点1：**每个二极管为对应的电容单极性充电
- ✓ **特点2：**电容一般同向串联，且后级不直接连变压器
- ✓ **过程：**C1充电...C2充电...C3充电...
- ✓ **缺点：**带负载能力差(外特性软)，脉动大

电源的运用经验

- ☑ 高精度模拟电路：线性稳压源
- ☑ 数字系统：开关电源
- ☑ 大功率系统：开关电源
- ☑ 电池供电系统：DC-DC 模组
- ☑ 高压低功耗系统：DC-DC 升压开关电源
- ☑ 纯集成电路：开关电源（尤其是电荷泵）
- ☑ 低功耗特高压：逆变-变压-整流
- ☑ 高压无功耗：倍压整流