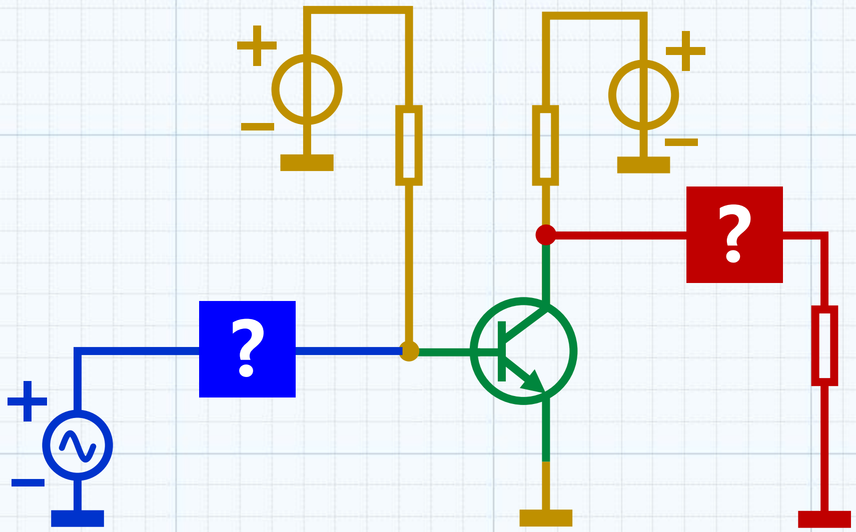
电子线路
分析与设计

第 12 讲 单管放大电路组态和分析

陈江

2023.10.30

放大：套路和思路



① 敏感器件
② 敏感状态
③ 输入通道
④ 输出通道
⑤ 功率增大

- 使器件静止时位于 Q
- 为放大过程提供能量

辅助电源

敏感的
非线性
放大器件

输入通道

- 导入扰动
- 但不影响 Q

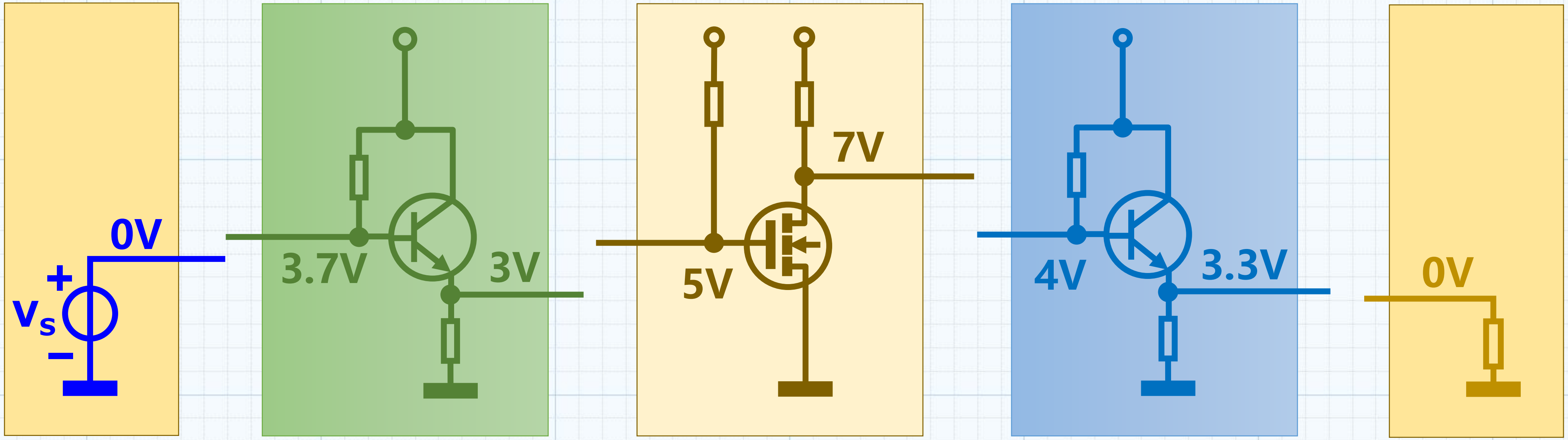
输出通道

- 导出应变
- 但不影响 Q

敏感器件

- 小扰动引起大变动
- 需位于敏感区域
- 譬如 Q 附近

耦合： 问题症结 和 设计要求



1 信号通行基本无碍

2 不至影响偏置状态

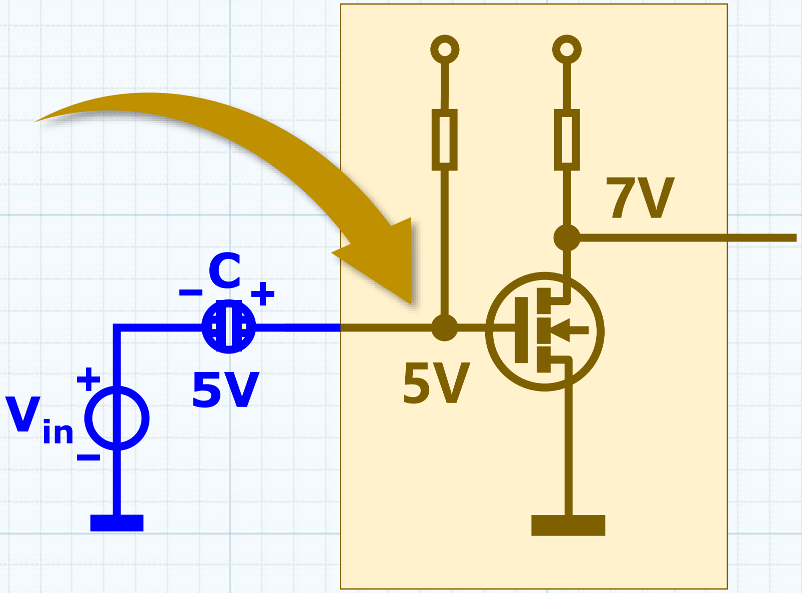
3 简单易行

耦合：电容

$V_G = 5 + V_{in}$

静态工作点

动态信号



1 信号通行基本无碍

2 不至影响偏置状态

3 简单易行

☒ 电阻分去电压！

☒ 电阻分去电压！

☒ 外加电源代价大！

$V_C=Q/C$

$V_C'=I/C$

若 C 非常大

$V_C' \approx 0$

V_C为常数

若 $V_{in}=0$
则 $V_G=5V$

$V_C=5$

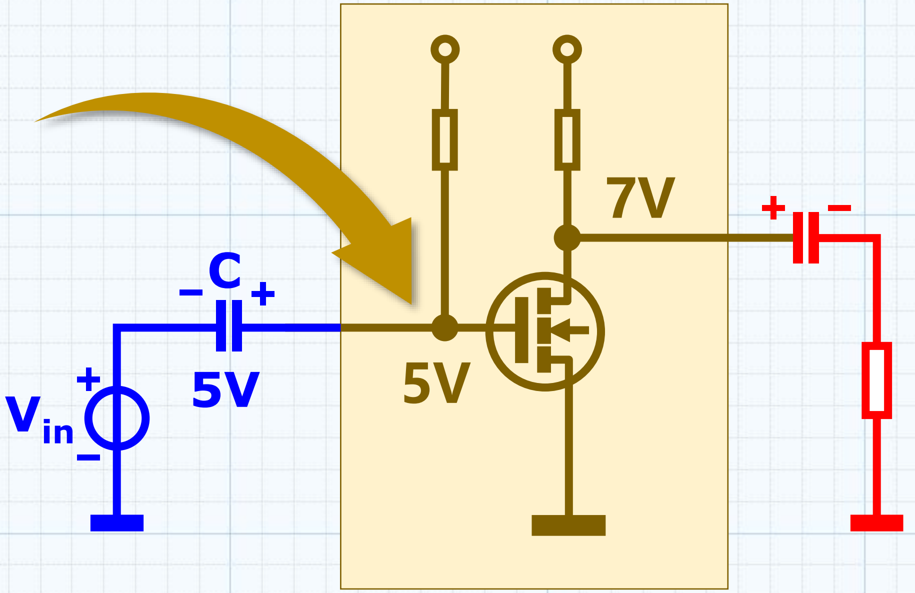
$V_G = 5 + V_{in}$

耦合：电容

$V_G = 5 + V_{in}$

静态工作点

动态信号



? 输出端情形类似？

是的

? 电容类何时充电？

开机时　　Q变化时

? 正好充那么多电？

多退少补，直至平衡

1 信号通行基本无碍

2 不至影响偏置状态

3 简单易行

? 电容不大则如何？

V_C变化 → 产生误差

不同频率 → 不同误差

? 源非理想呢？

传输产生亏损

呈简单分压关系

? 信号缓变则如何？

传输损失较大 → 不同误差

? 负载非理想呢？

传输产生亏损

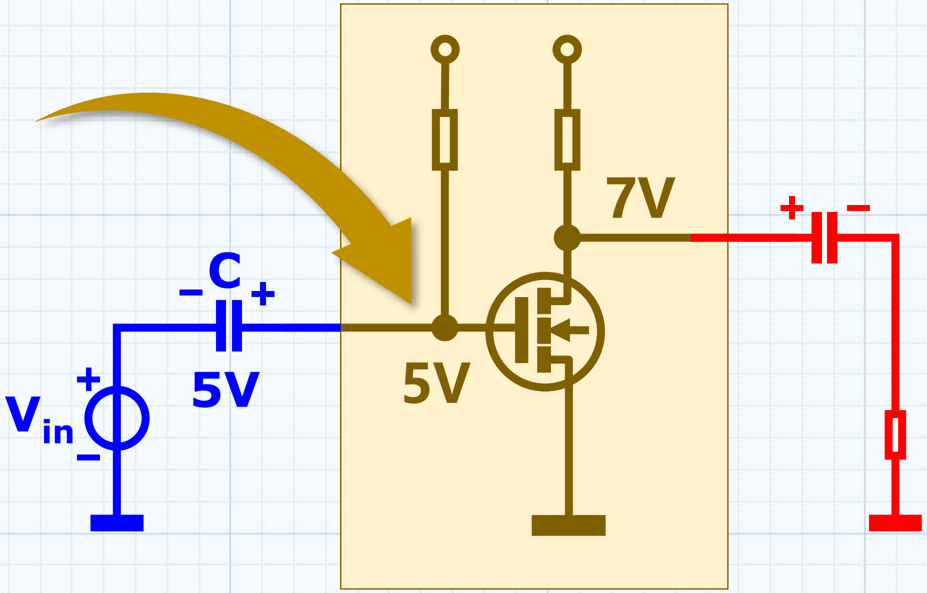
呈简单分压关系

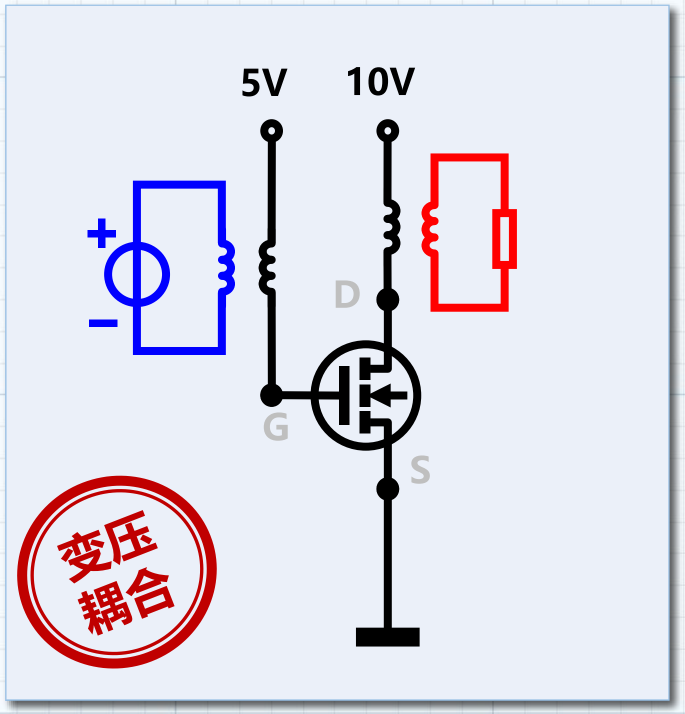
耦合：其它

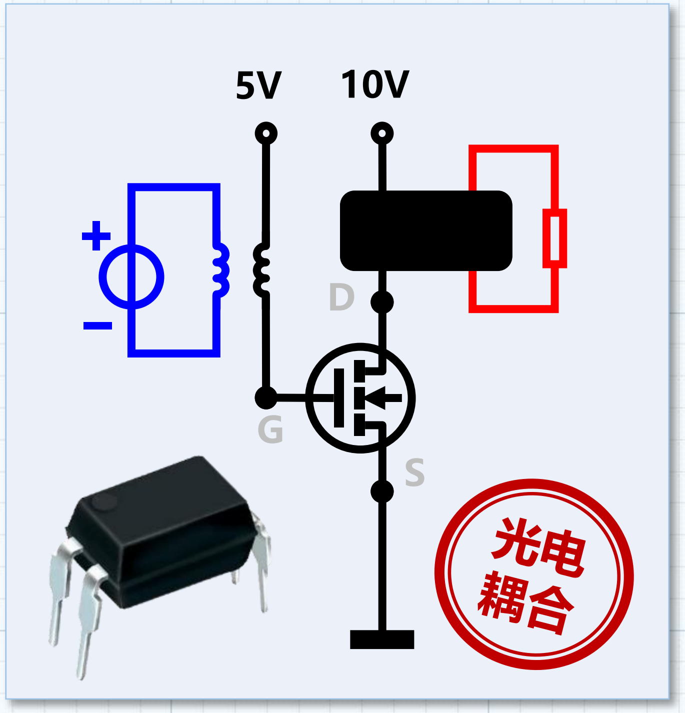
$V_G = 5 + V_{in}$

静态工作点

动态信号







1 信号通行基本无碍

2 不至影响偏置状态

3 简单易行

相对优势？

变压器：电气隔离

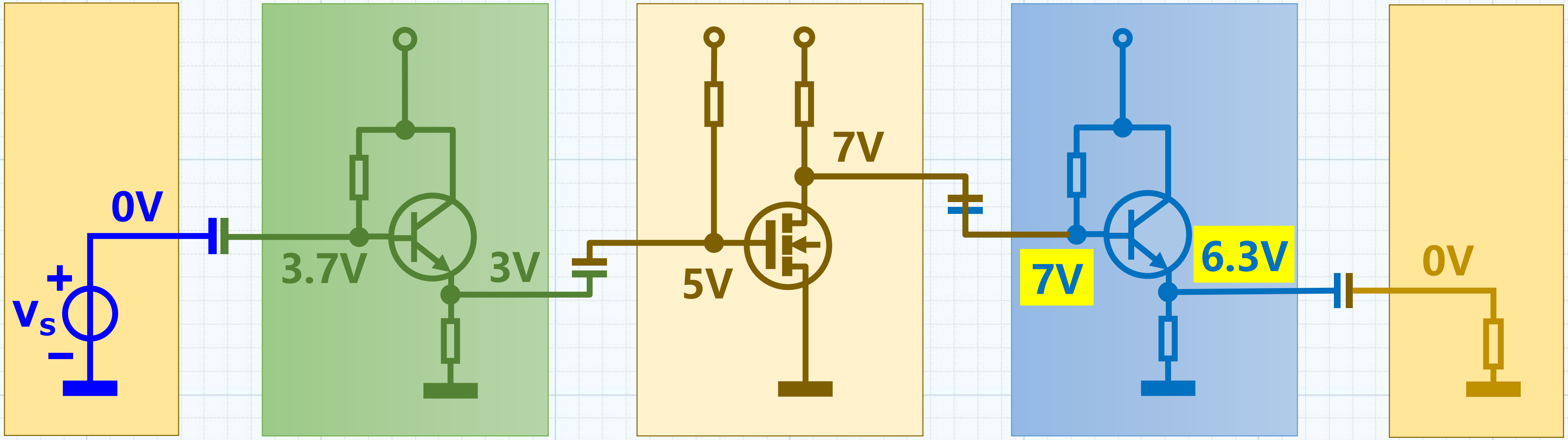
光电：电气隔离+单向性

相对劣势？

变压器：笨重+昂贵

光电：尺寸+非线性

耦合：直接耦合



1 信号通行基本无碍

2 不至影响偏置状态

3 简单易行

? 若前后级工作点正好可以相同？

可以直接连接 → 直接耦合（直流耦合）

? 直耦的优势？

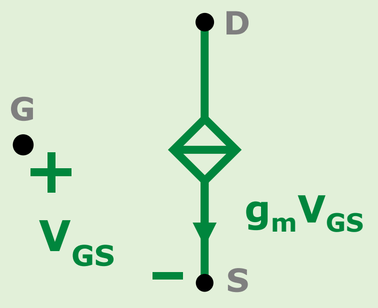
可传递任意频率的信号
其它方式均为交流耦合

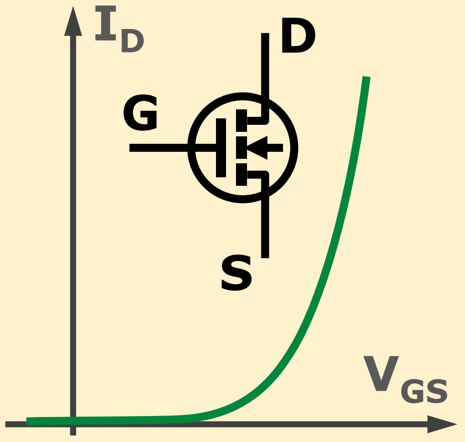
? 直耦的劣势？

设计分析都比较麻烦
各级工作点相互影响

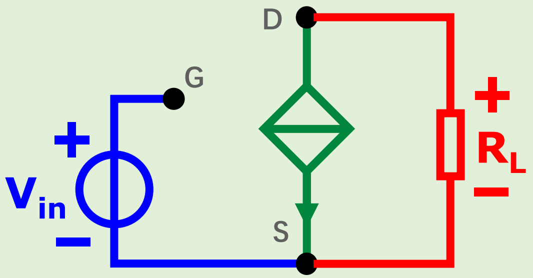
组态：可用

微扰模型





组态1



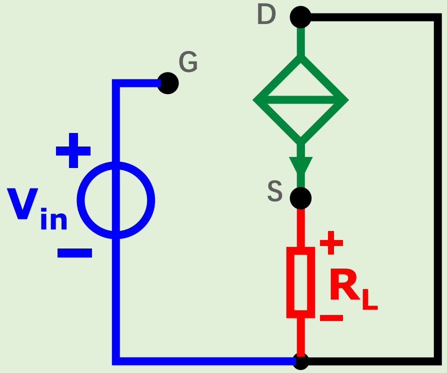
$$V_{GS} = V_{in}$$

$$V_{RL} = -R_L I_D = -R_L g_m V_{in}$$

电压放大

电流放大

组态2



$$V_{GS} = V_{in} - V_{RL}$$

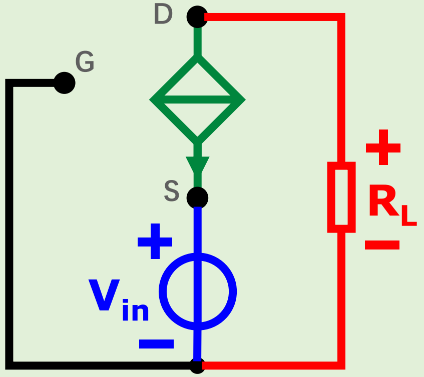
$$V_{RL} = R_L I_D = R_L g_m (V_{in} - V_{RL})$$

$$= V_{in} R_L g_m / (1 + R_L g_m)$$

电压跟随

电流放大

组态3



$$V_{GS} = -V_{in}$$

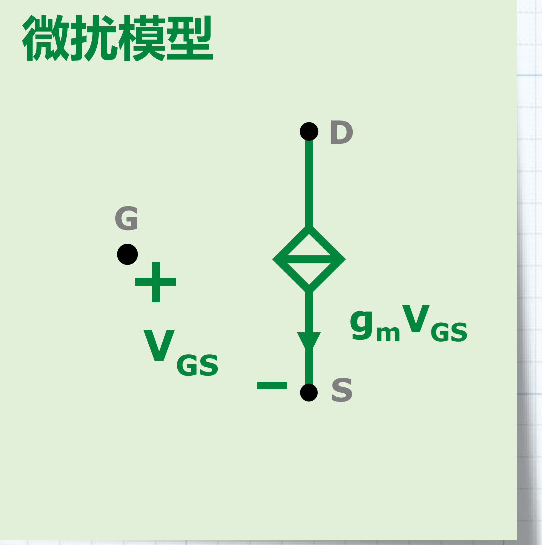
$$V_{RL} = -R_L I_D = R_L g_m V_{in}$$

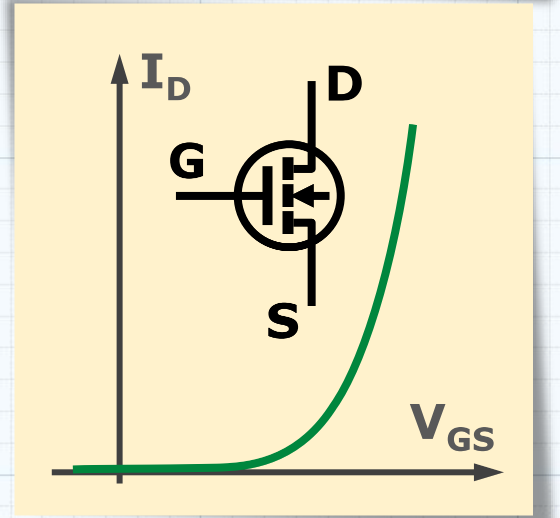
电压放大

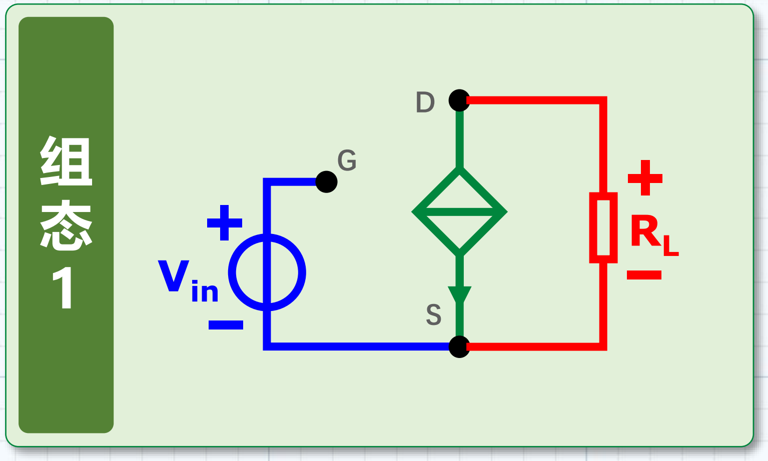
电流跟随

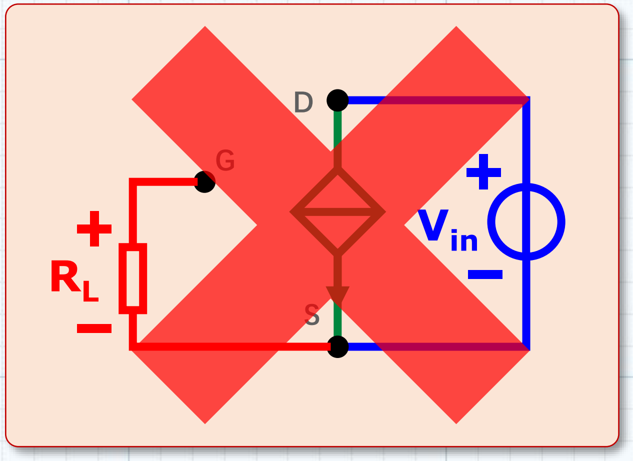
组态：弃用

微扰模型



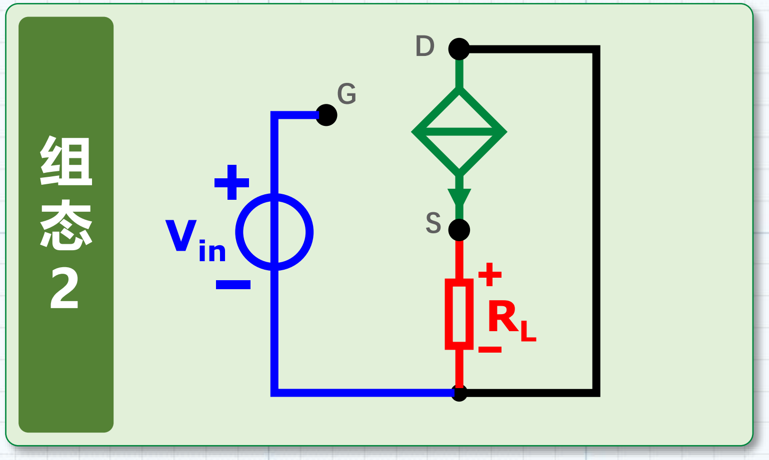


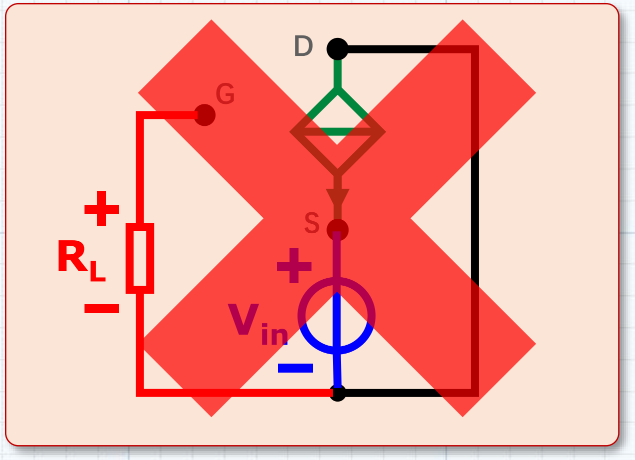




$I_G \equiv 0$

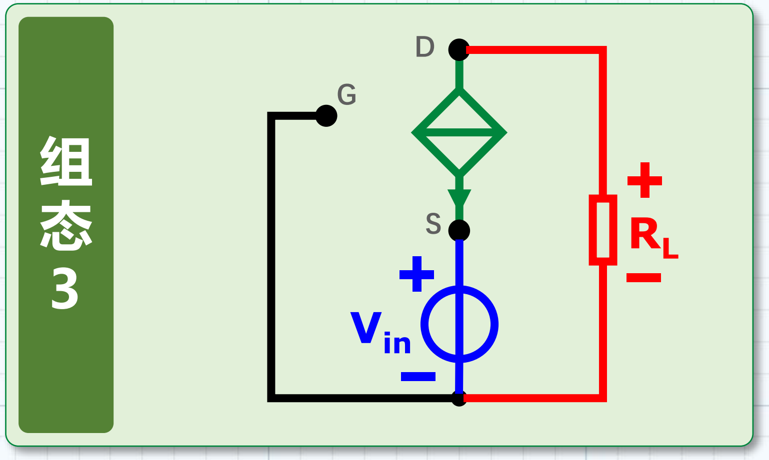
$V_{RL} \equiv 0$

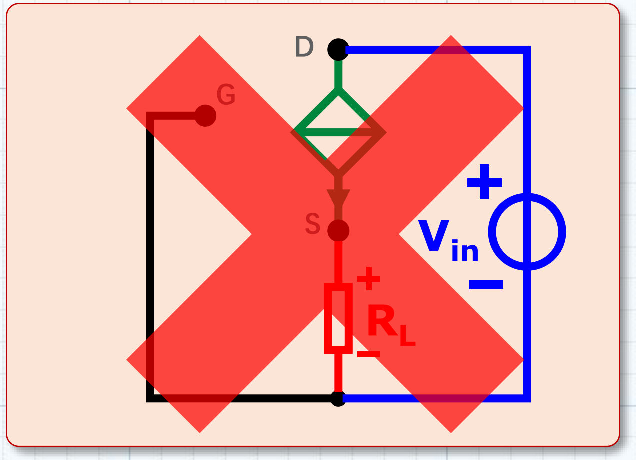




$I_G \equiv 0$

$V_{RL} \equiv 0$





假设 $V_{GS}>0$

→ $I_{DS}>0$

→ $V_{RL}>0$

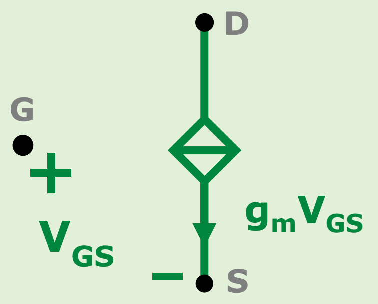
→ $V_{GS}<0$

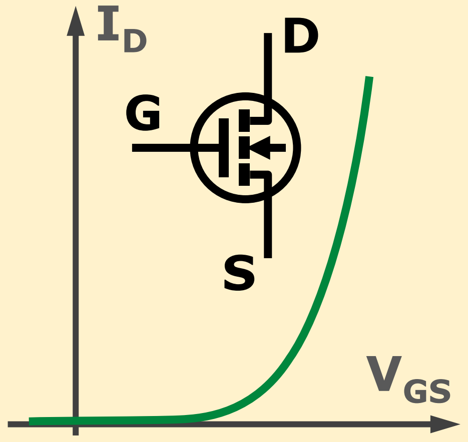
→ 矛盾

反之亦然

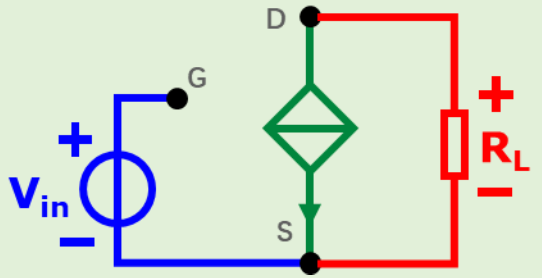
组态：命名

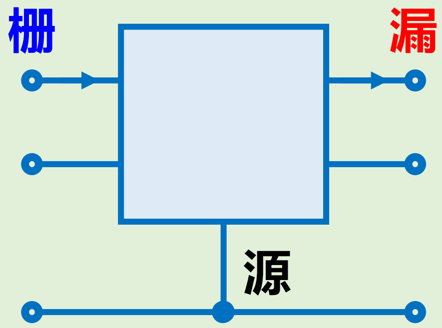
微扰模型





组态1



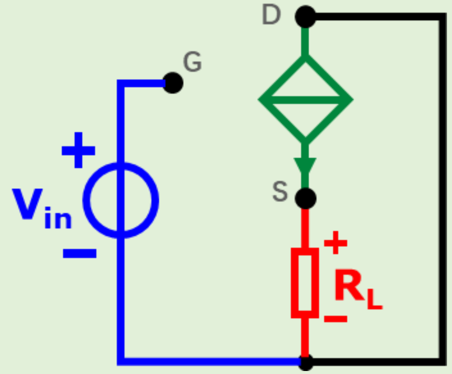


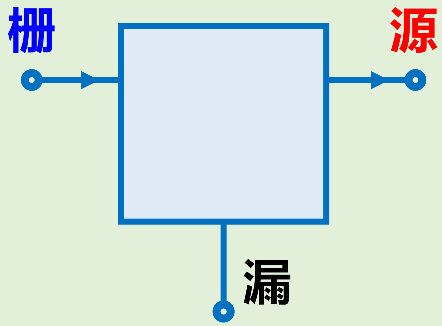
共源极放大器

Common Source

☑ 电压放大
☑ 电流放大

组态2



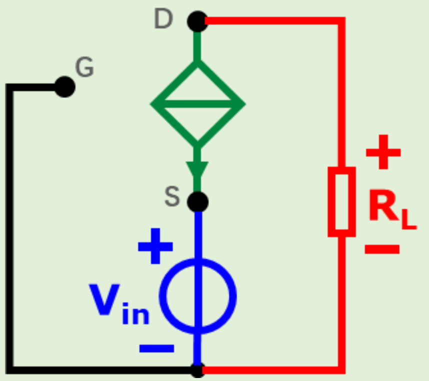


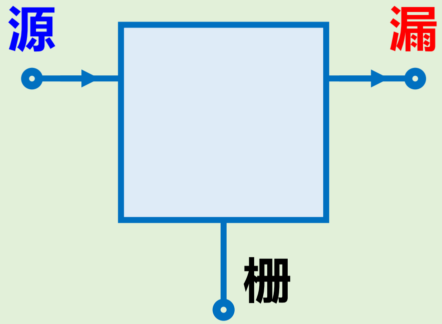
共漏极放大器

Common Drain

☑ 电压跟随
☑ 电流放大

组态3





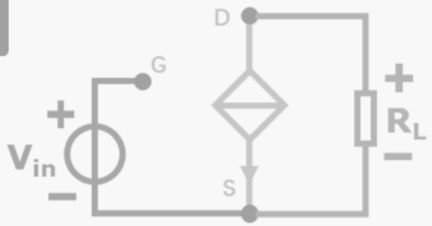
共栅极放大器

Common Gate

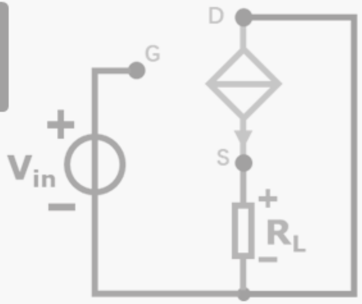
☑ 电压放大
☑ 电流跟随

典型：组态+晶体管+偏置+耦合

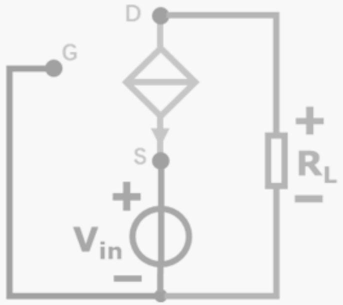
共源



共漏

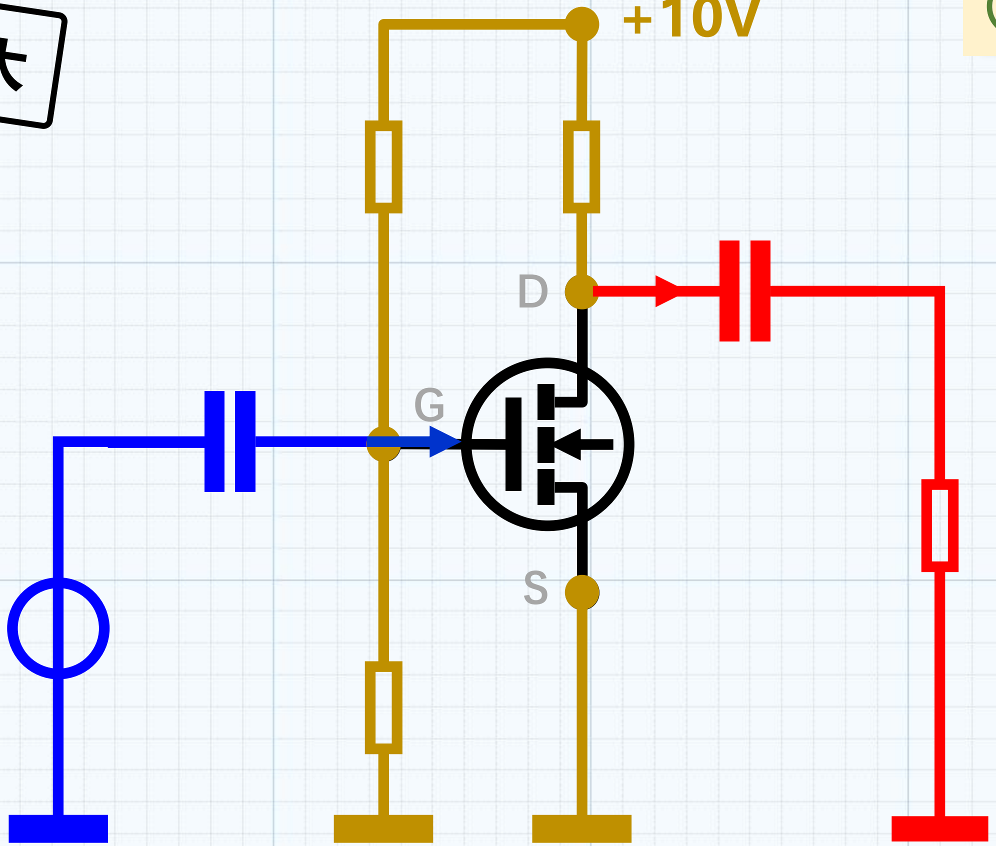


共栅



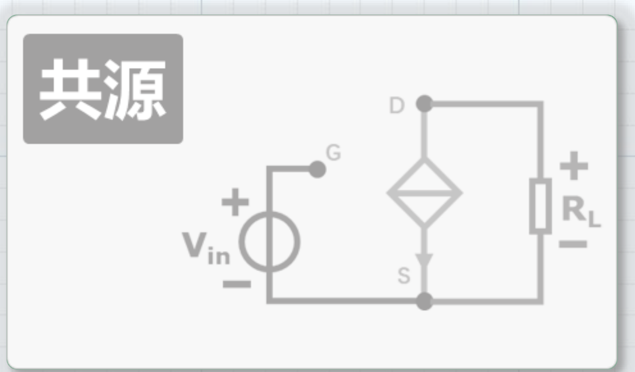
电压放大

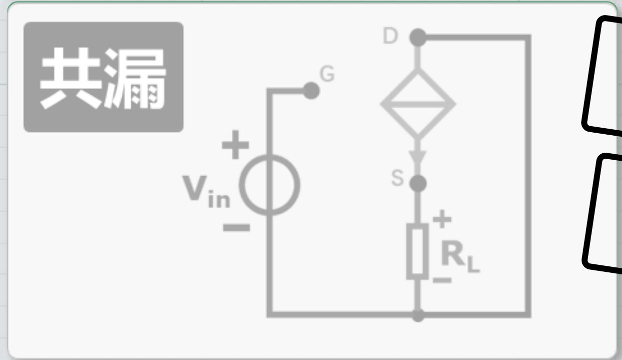
电流放大



①敏感器件 ☑
②敏感状态 ☑
③输入通道 ☑
④输出通道 ☑
⑤功率增大 ☑

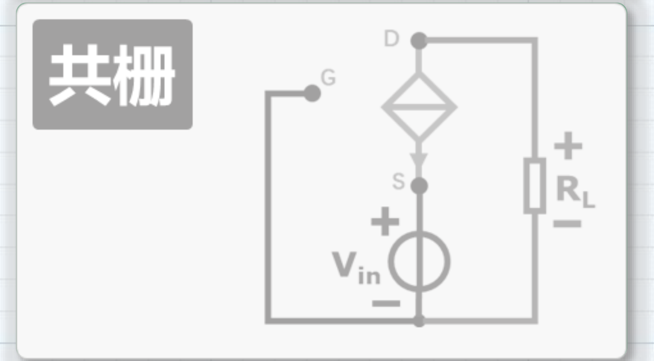
典型：组态+晶体管+偏置+耦合

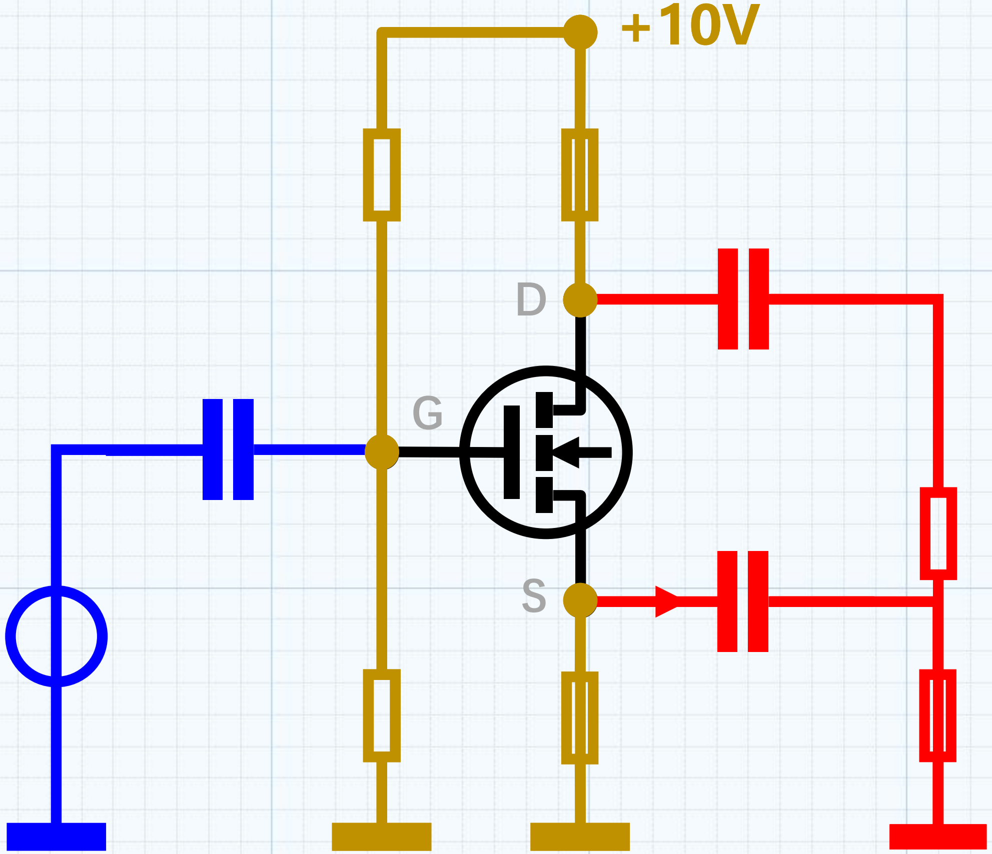




电压跟随

电流放大





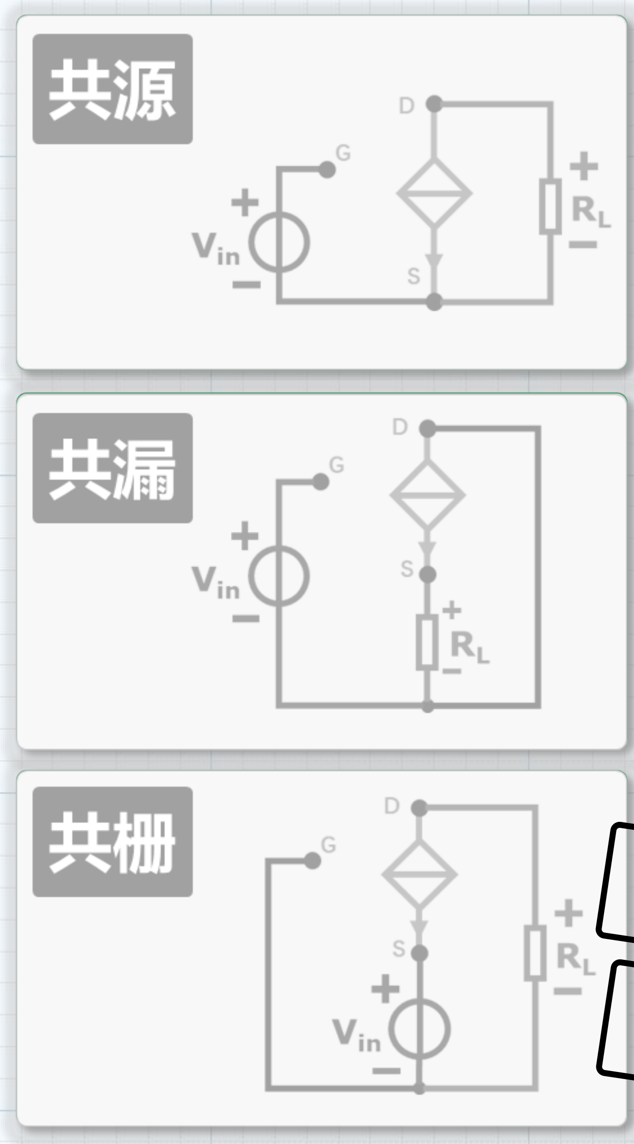
? 其它调整？

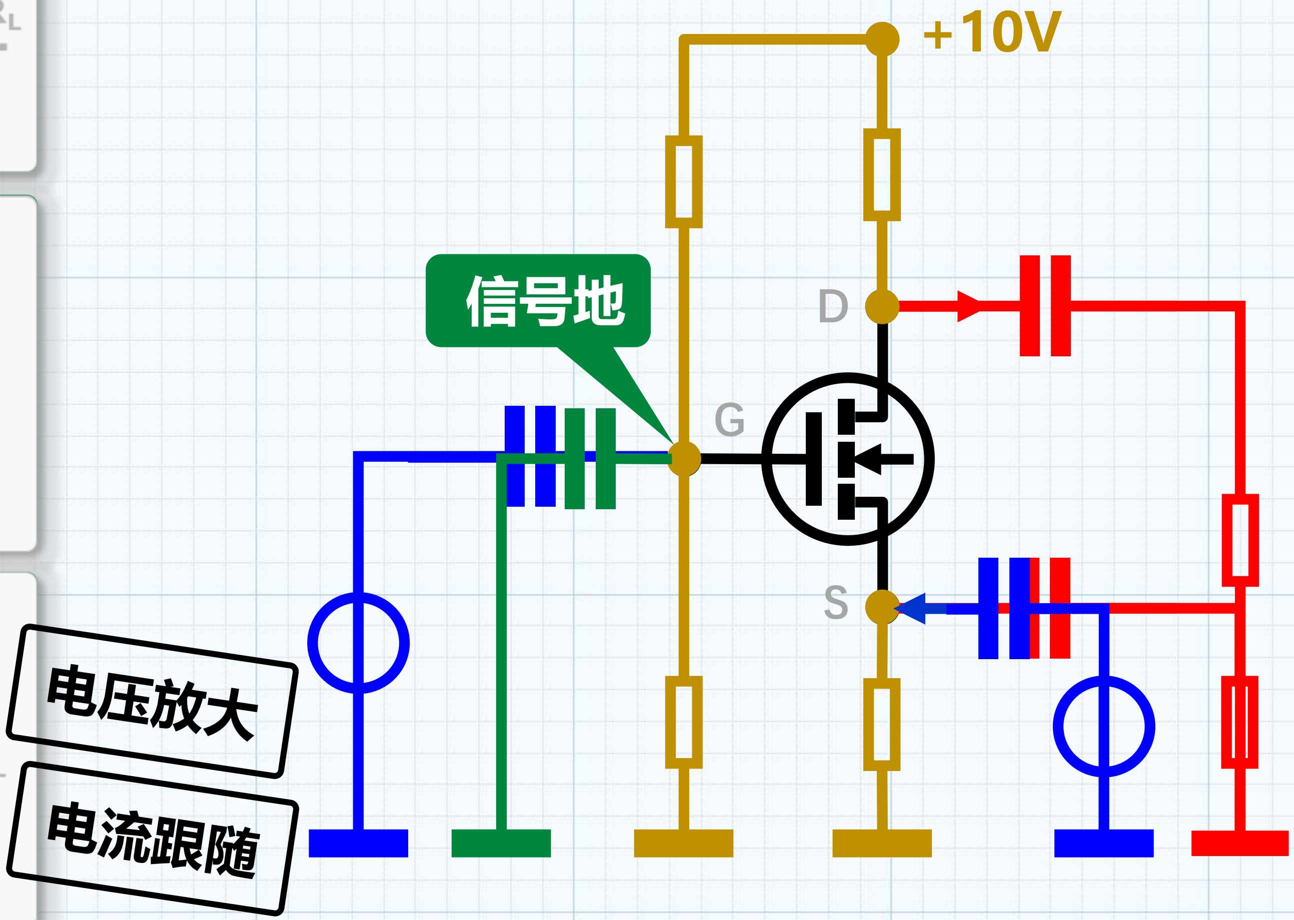
偏置电路

? 有哪些变化？

性能大不相同

典型：组态+晶体管+偏置+耦合





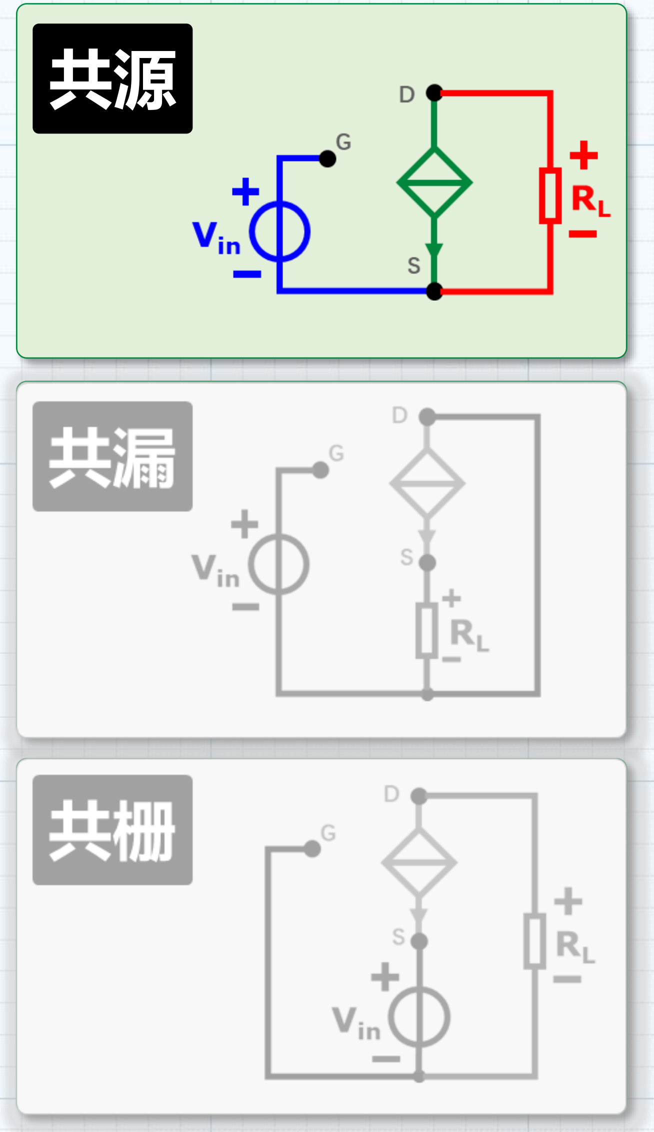
❓ 其它调整？

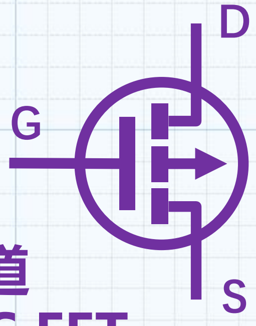
偏置电路

❓ 有哪些变化？

性能大不相同

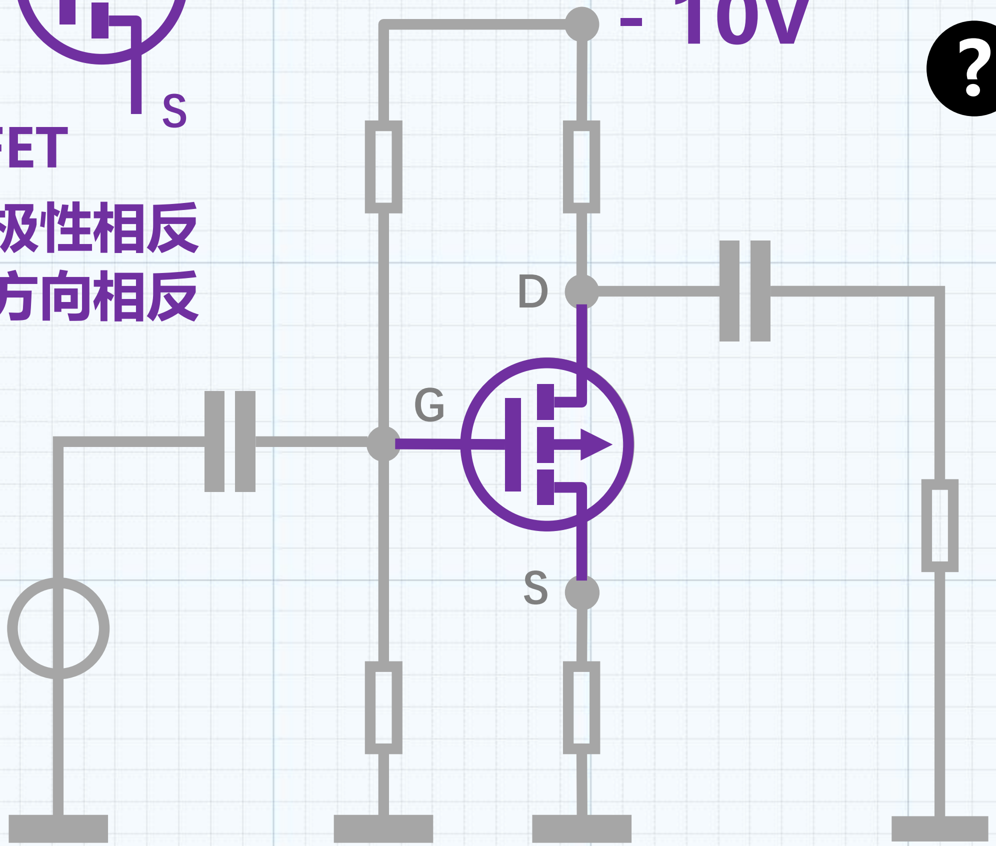
典型：组态+晶体管+偏置+耦合





P沟道
MOS FET

- 电压极性相反
- 电流方向相反



哪些 V 有变？

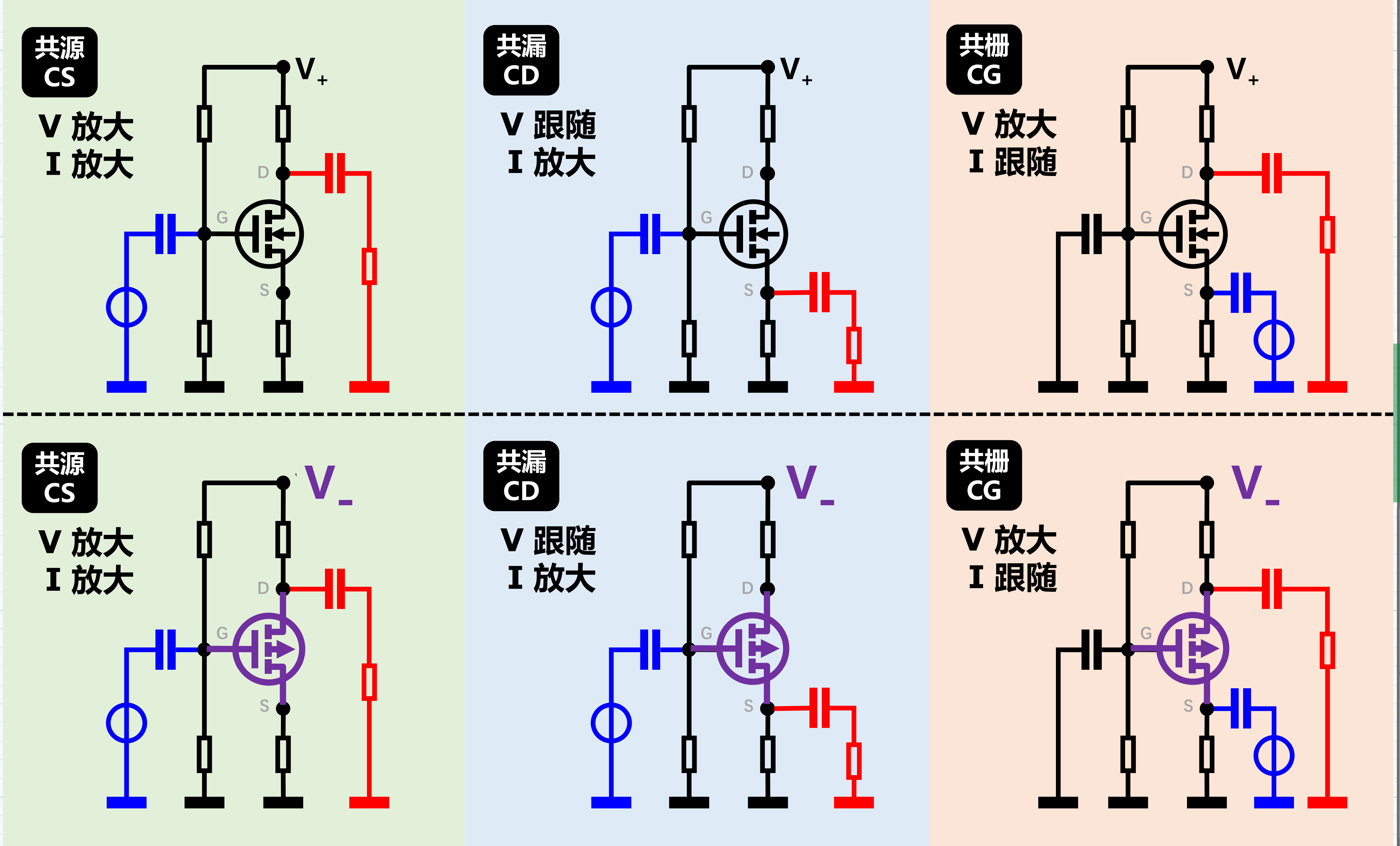
直流电压

哪些 I 有变？

直流电流

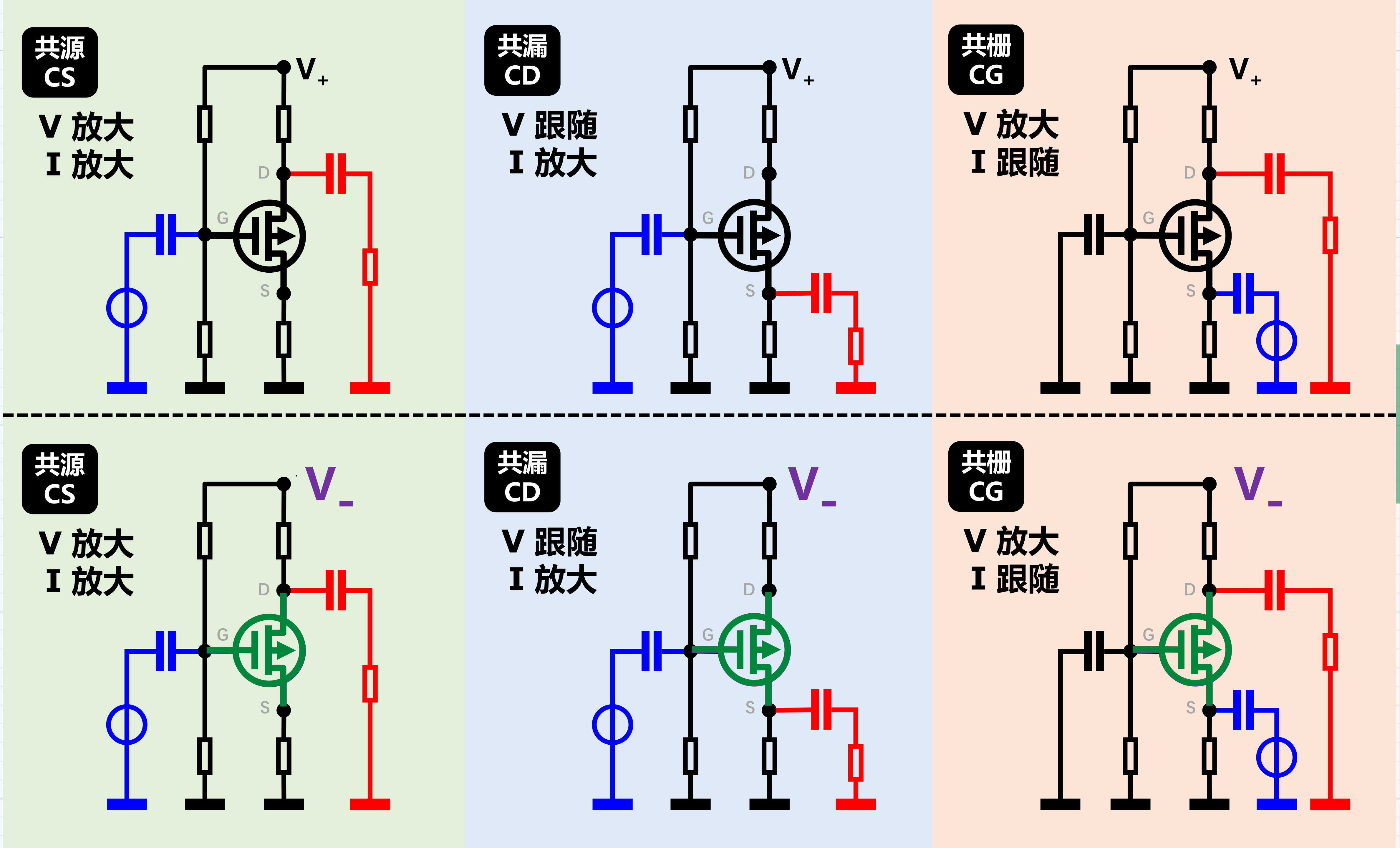
组态呢？

完全相同


共源
CS
V 放大
I 放大
V+
D
G
S
共漏
CD
V 跟随
I 放大
V+
D
G
S
共栅
CG
V 放大
I 跟随
V+
D
G
S
共源
CS
V 放大
I 放大
V-
D
G
S
共漏
CD
V 跟随
I 放大
V-
D
G
S
共栅
CG
V 放大
I 跟随
V-
D
G
S

耦合

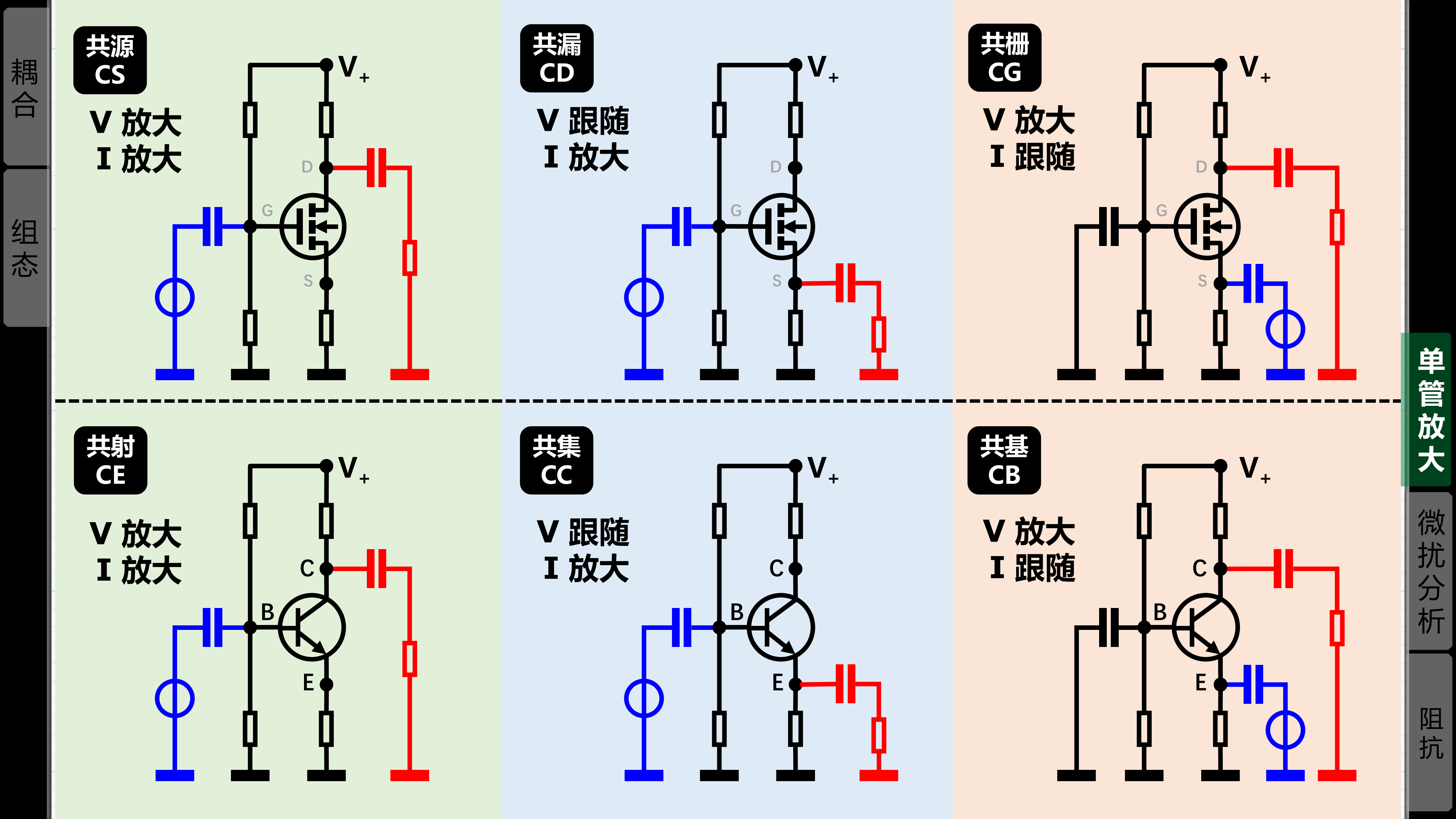
组态

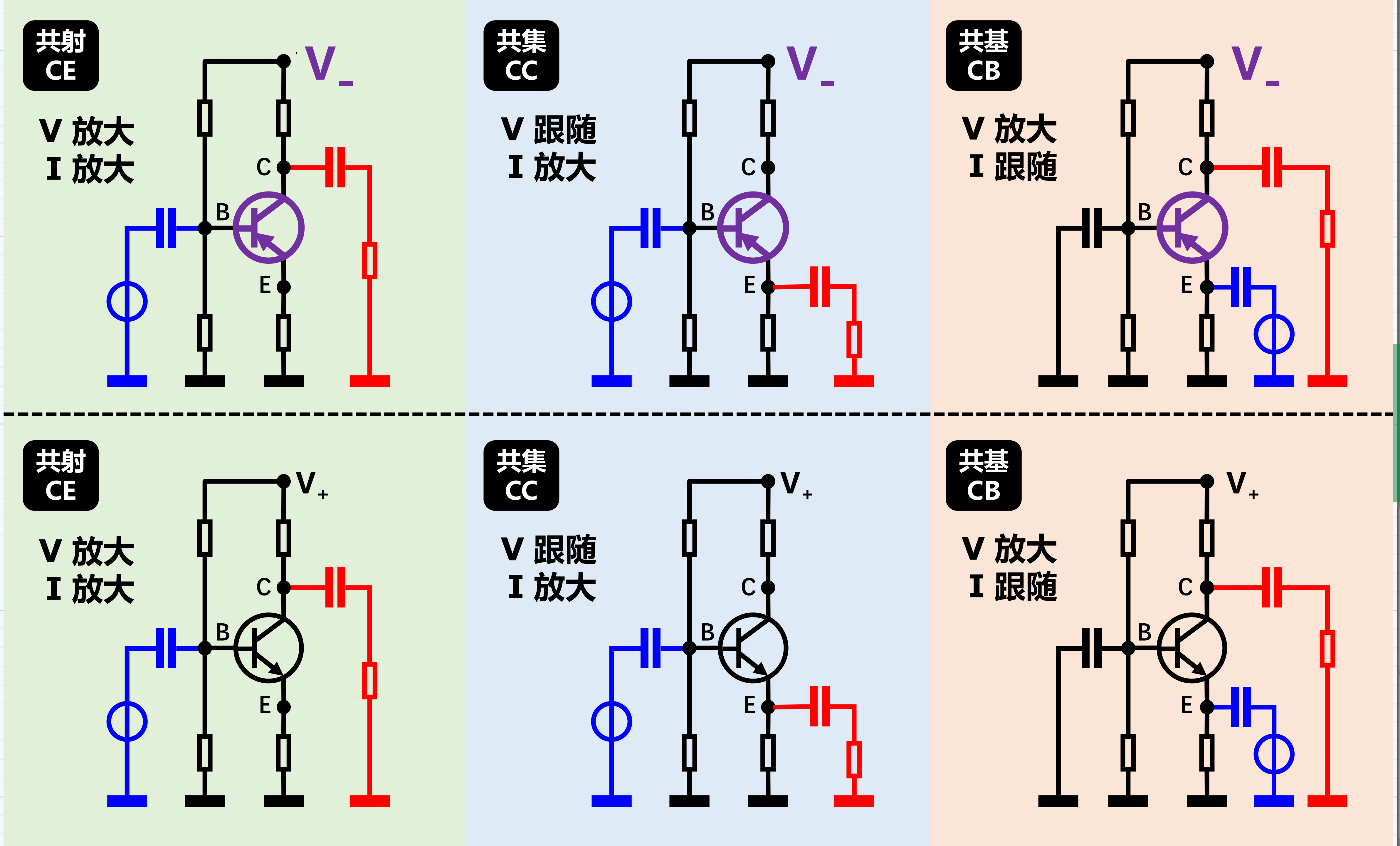


单管放大

微扰分析

阻抗


耦合
组态
单管放大
微扰分析
阻抗
共源 CS
V 放大
I 放大
共漏 CD
V 跟随
I 放大
共栅 CG
V 放大
I 跟随
共射 CE
V 放大
I 放大
共集 CC
V 跟随
I 放大
共基 CB
V 放大
I 跟随
V+
D
G
S
C
B
E


共射
CE
V 放大
I 放大
V-
C
B
E
共集
CC
V 跟随
I 放大
V-
C
B
E
共基
CB
V 放大
I 跟随
V-
C
B
E
共射
CE
V 放大
I 放大
V+
C
B
E
共集
CC
V 跟随
I 放大
V+
C
B
E
共基
CB
V 放大
I 跟随
V+
C
B
E

放大器的分析：思路

估算作图

非线性

静态分析

前提条件

① 敏感器件

② 敏感状态

③ 输入通道

④ 输出通道

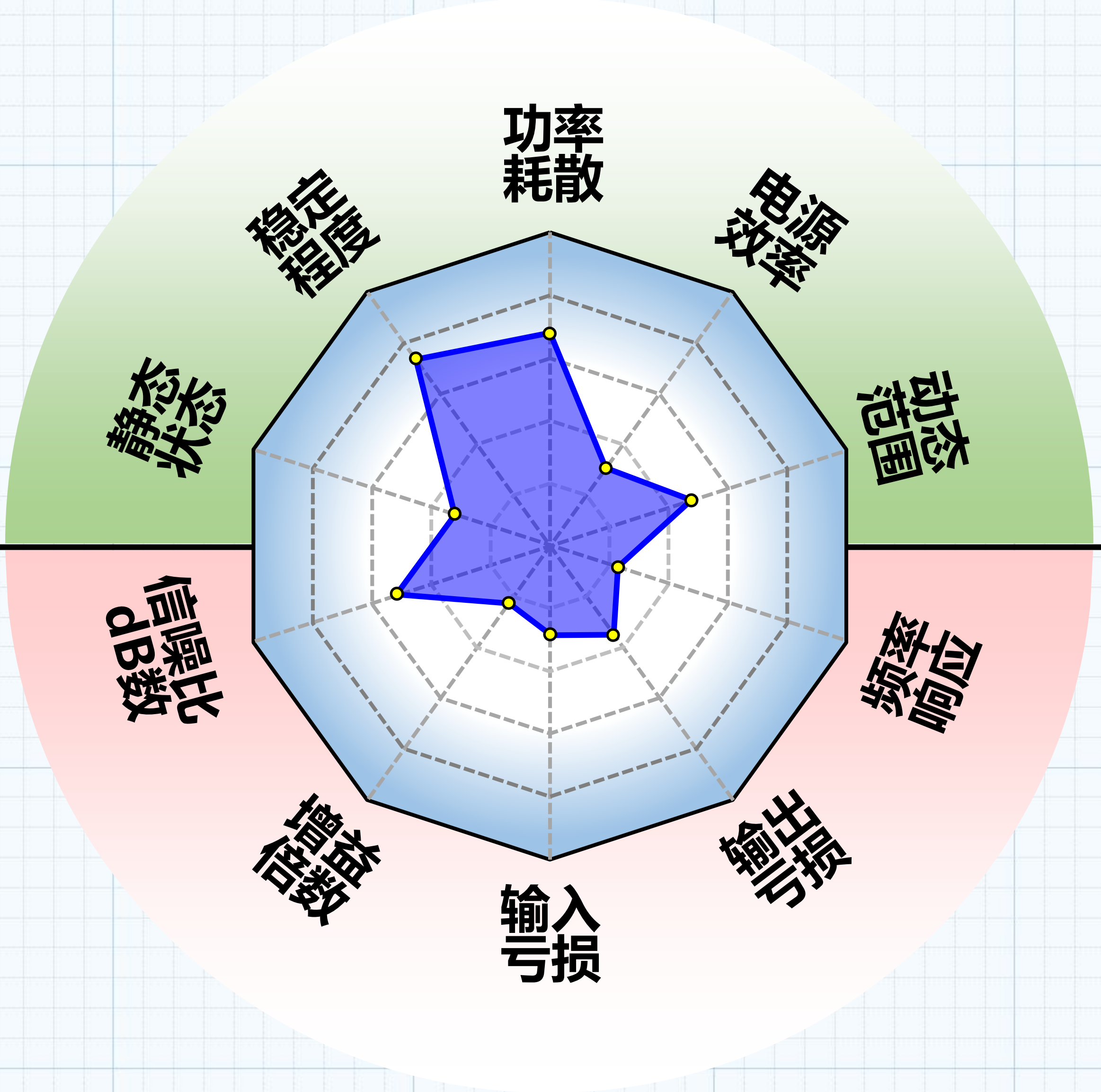
⑤ 功率增大

性能指标

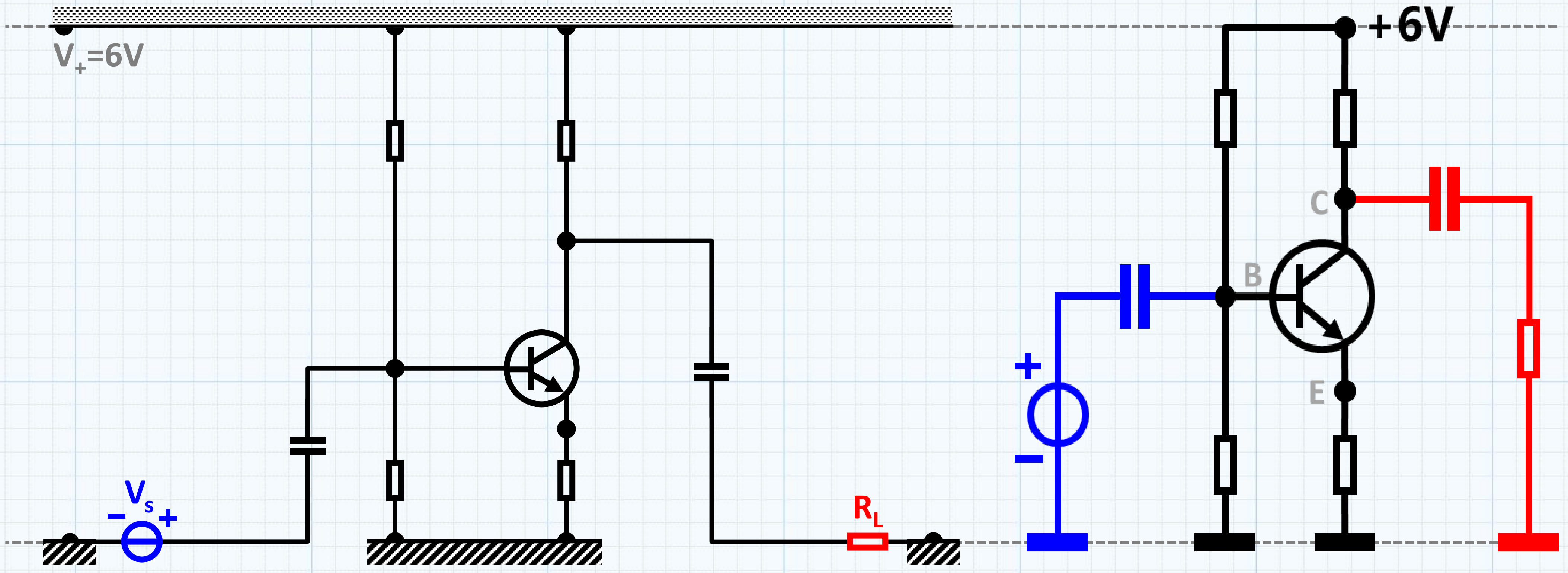
动态分析

近似线性

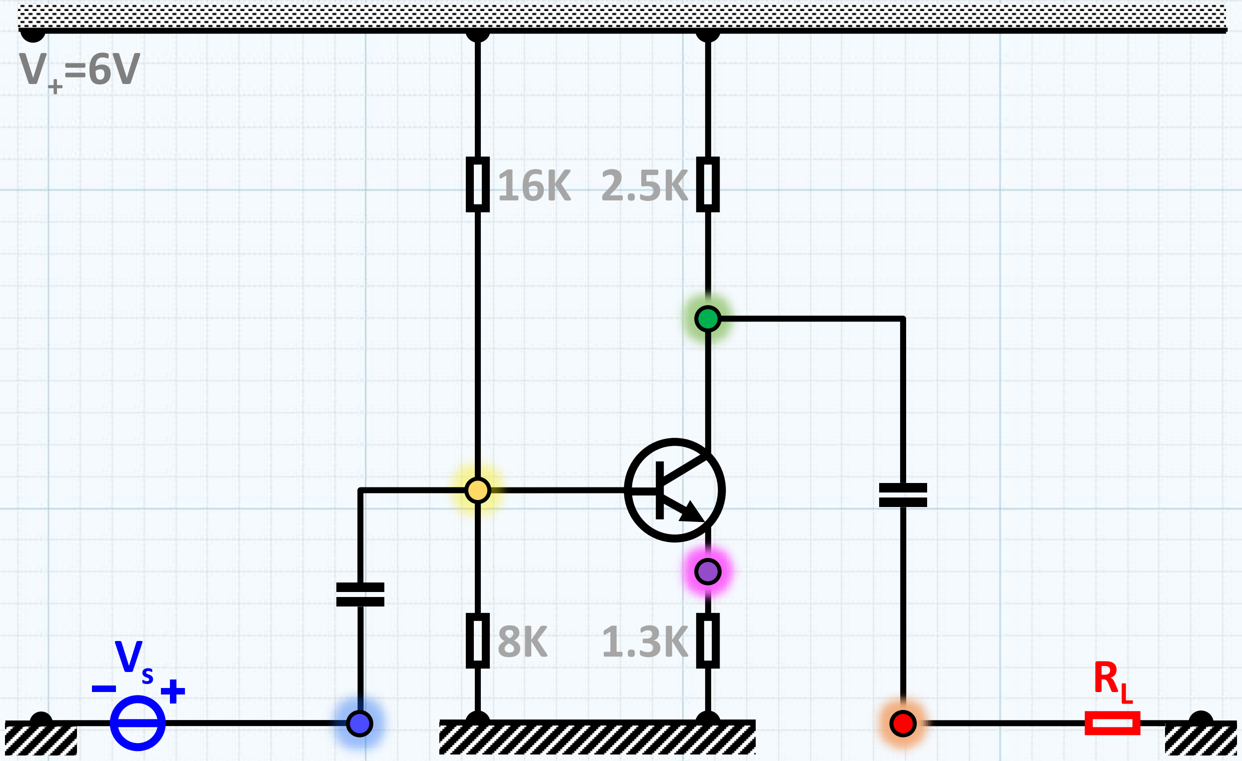
各种工具

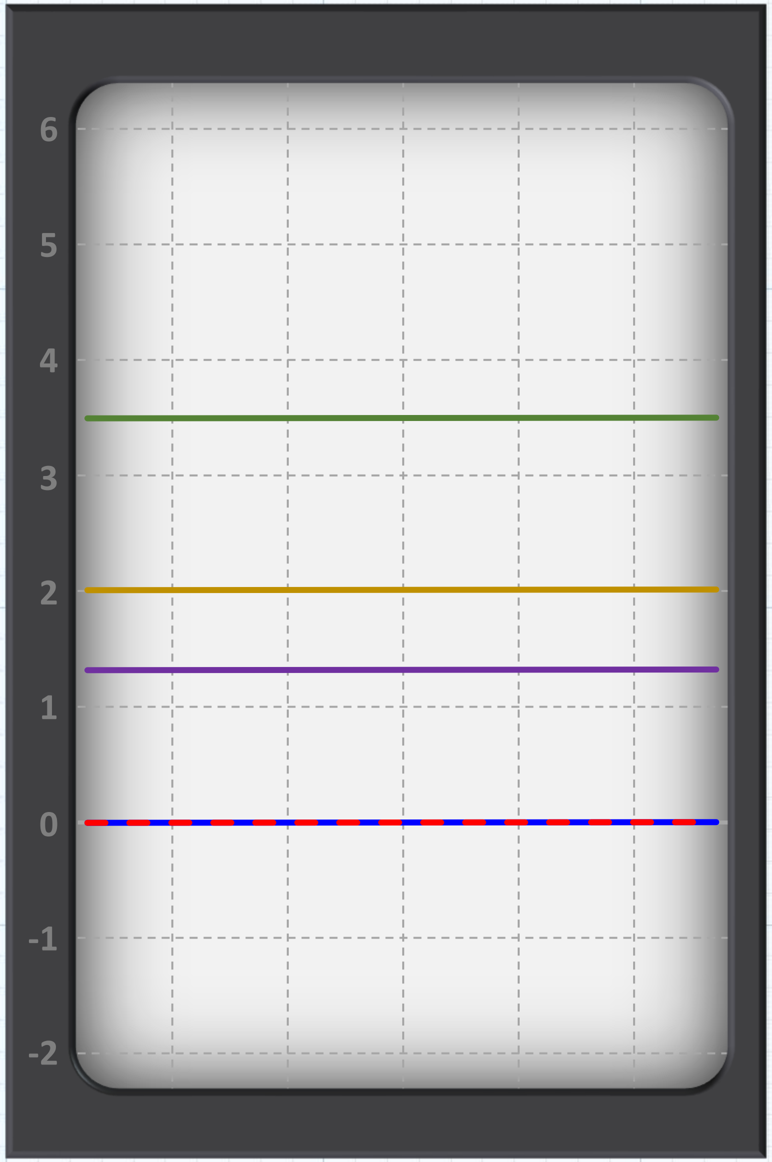


微扰分析： 直观印象



微扰分析：直观印象



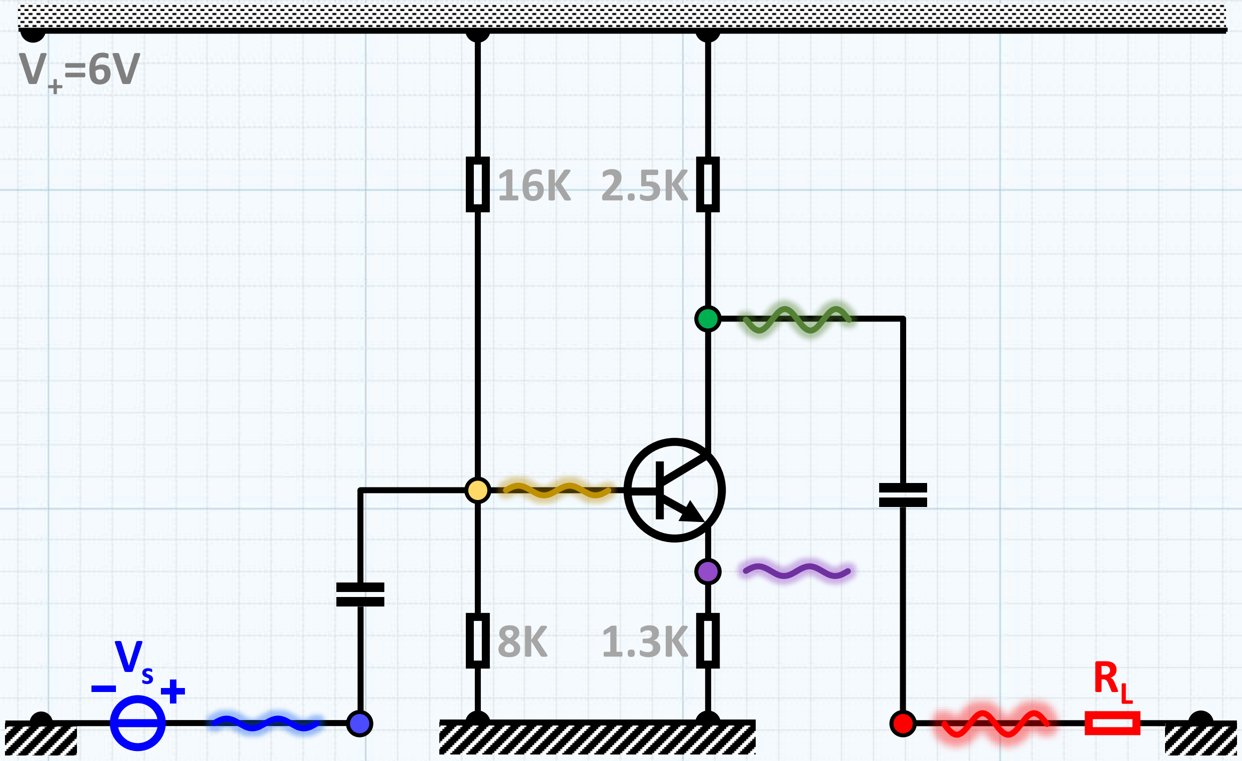


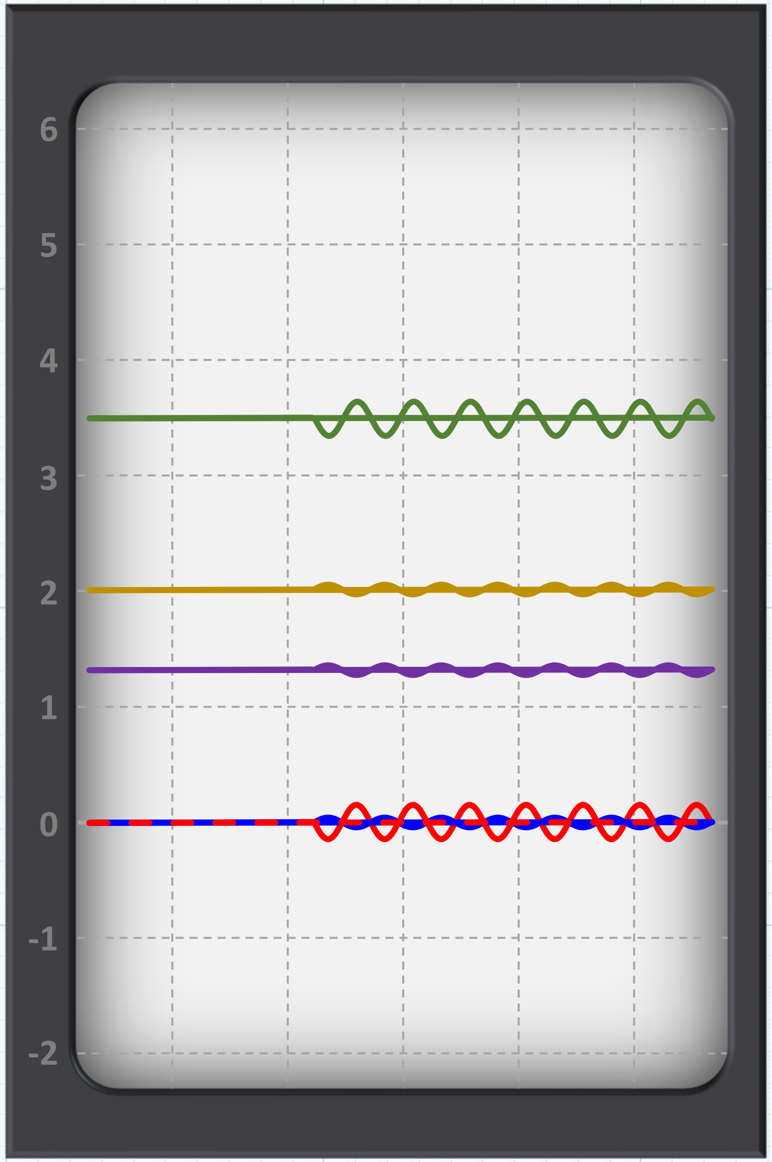
耦合

组态

单管放大

微扰分析： 直观印象

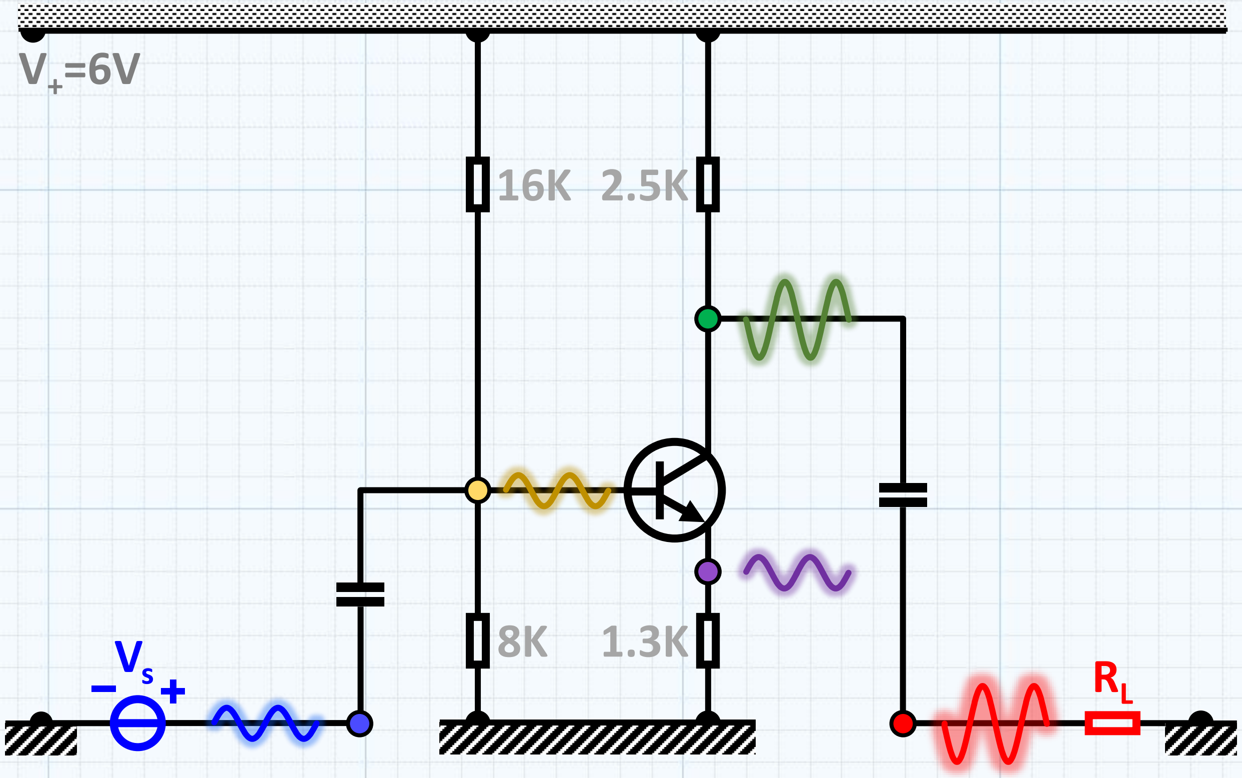


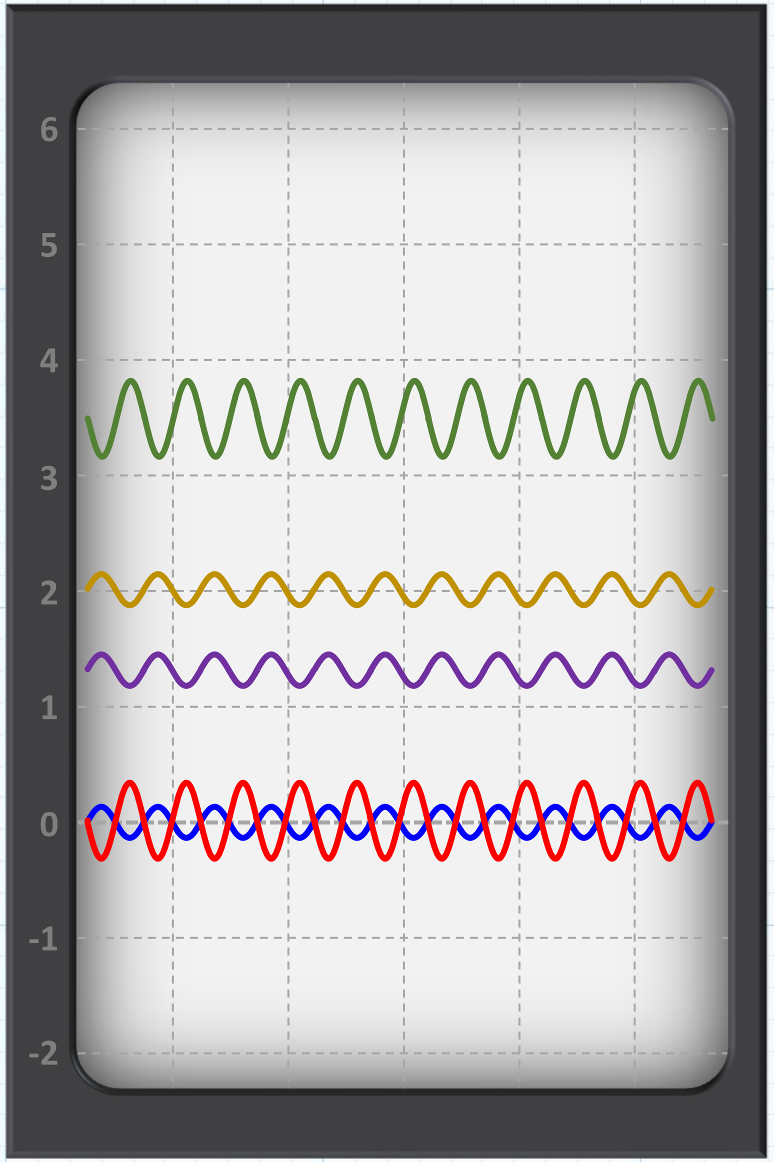


微扰分析

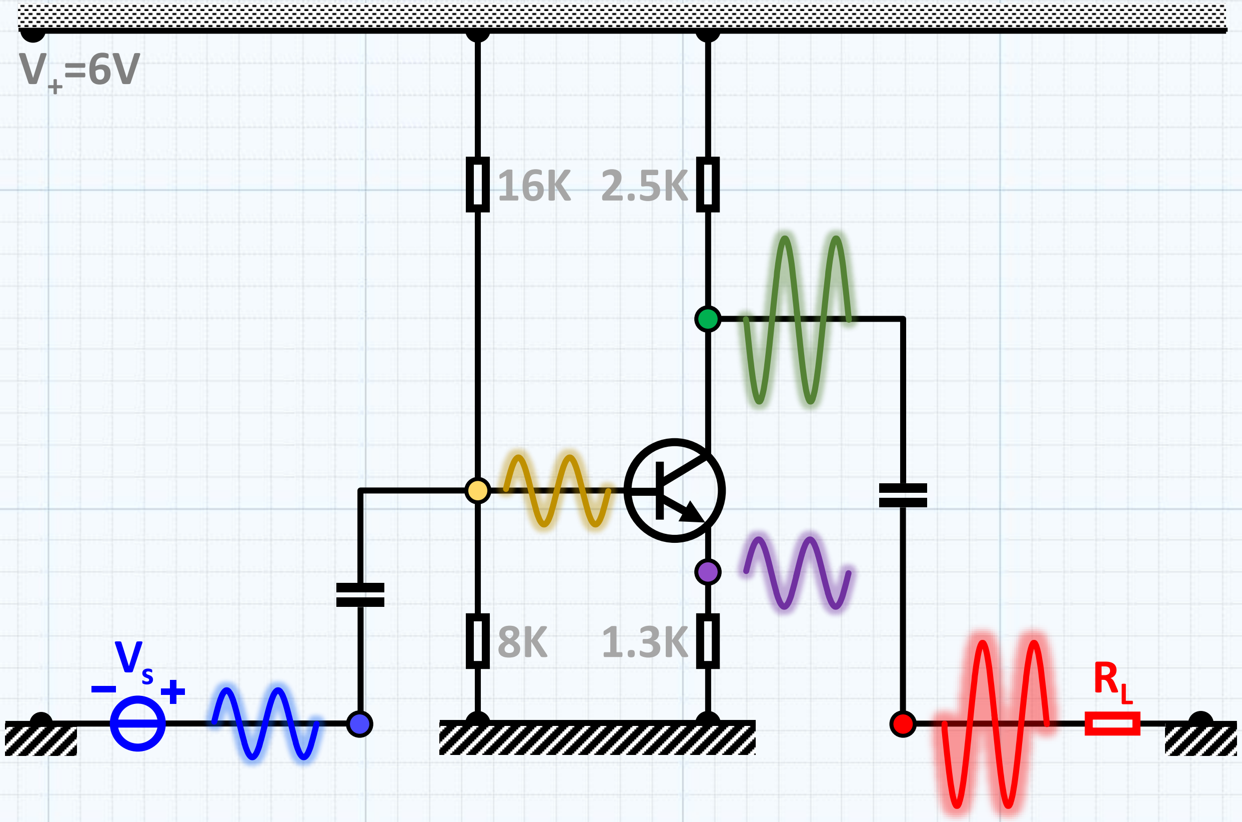
阻抗

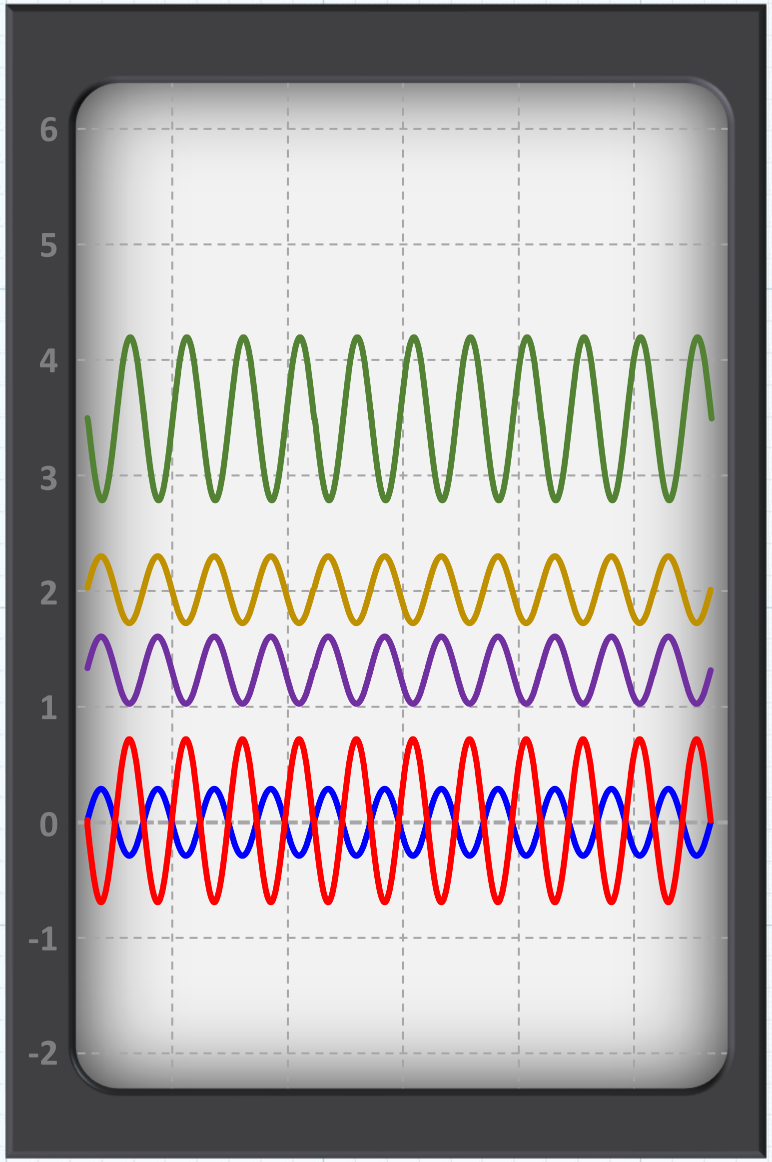
微扰分析：直观印象



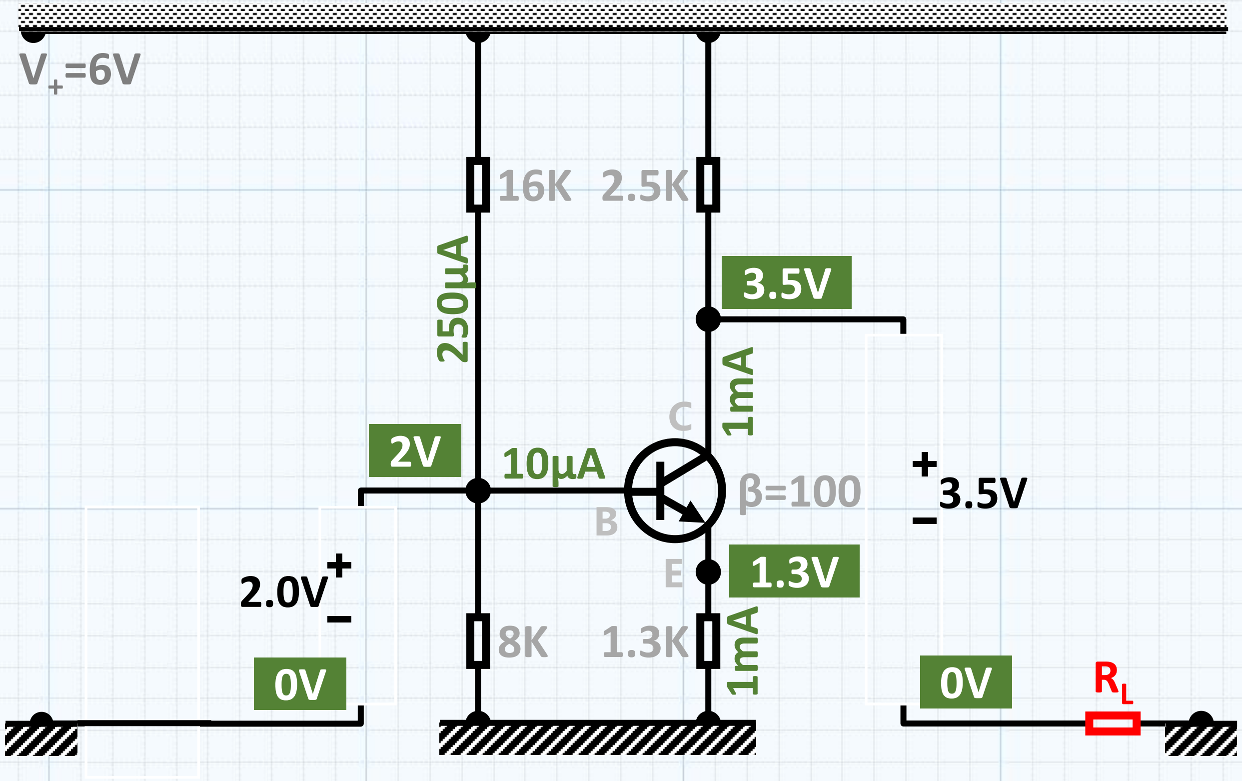


微扰分析：直观印象





微扰分析：准备工作：静态分析（直流分析）



求：各处电压、电流

目的1：确定 Q 点 OK

目的2：Q→部分动态参数

目的3：功耗、动态范围

假设1：BJT为放大状态

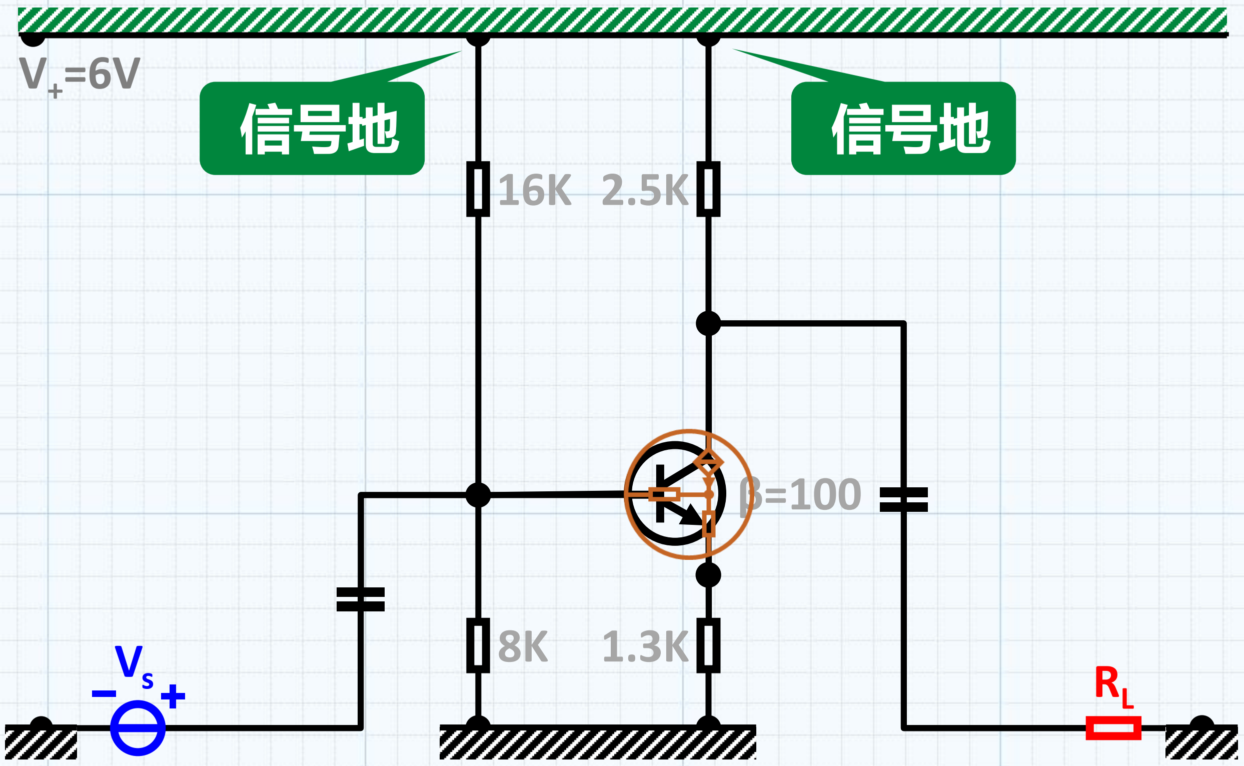
$$\begin{cases} V_{BE} \approx 0.7V \\ V_C > V_B \\ I_C = \beta I_B \end{cases}$$

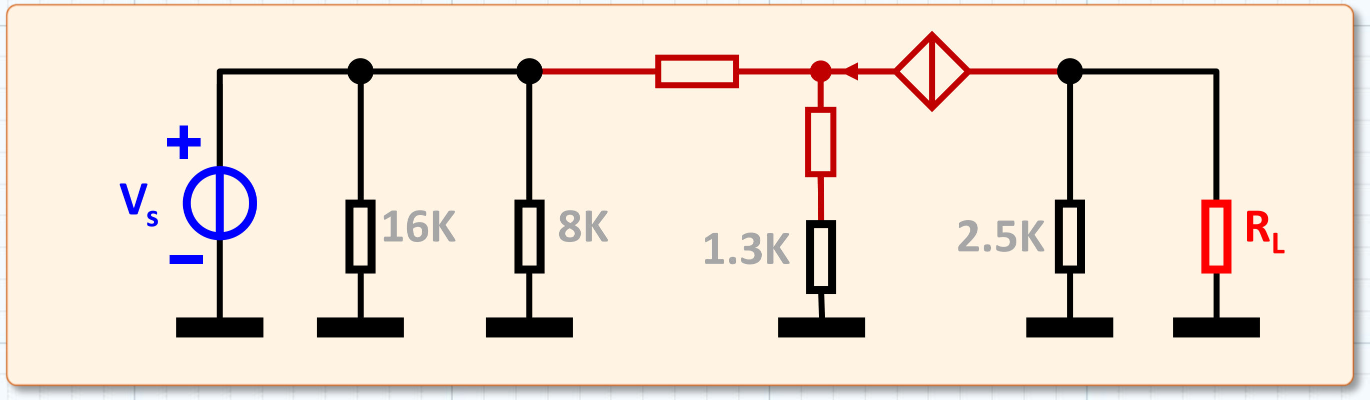
假设2：I_B 相对很小

做法：画出直流通道

1. 交流源置零
2. 电容→断；电感→短
3. 非线性器件 → 估算

微扰分析：性能分析：动态分析（交流分析）





性能：求各种指标

常见计算：A R_i R_o f_H …

作图、仿真、等效、估算

交流通道+微扰等效

1. 直流源 ➔ 零
2. 大C➔短；　大L➔断
3. 放大器件 ➔ 微扰模型
4. 求解线性电路

微扰分析：性能分析：动态分析（交流分析）

$I_E=I_B+100I_B=101\cdot I_B$

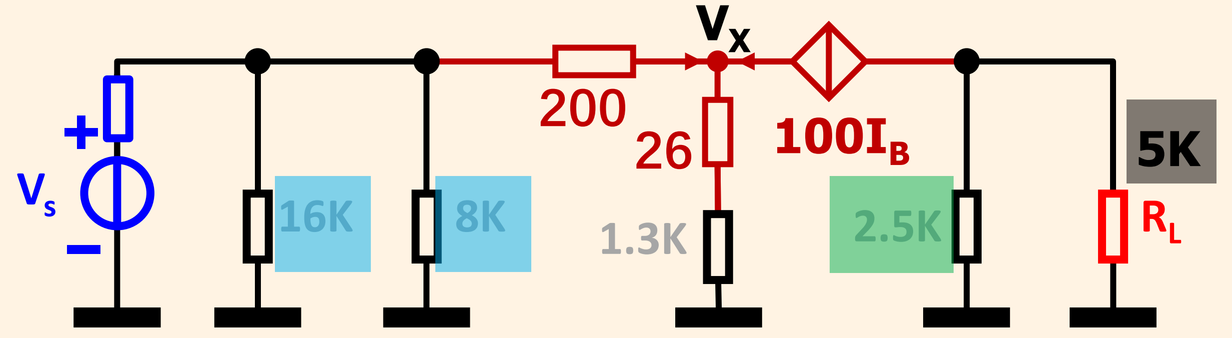
$V_X=101\cdot I_B\cdot(1.3K+26)$

$V_X+I_B\cdot 200=V_S$

$\Big\}\ I_B\approx V_S/134K$

$I_C=100\cdot I_B\approx 100V_S/134K$

$V_{RL}=-I_C\cdot(2.5K//5K)\approx -1.24\,V_S$



性能：求各种指标

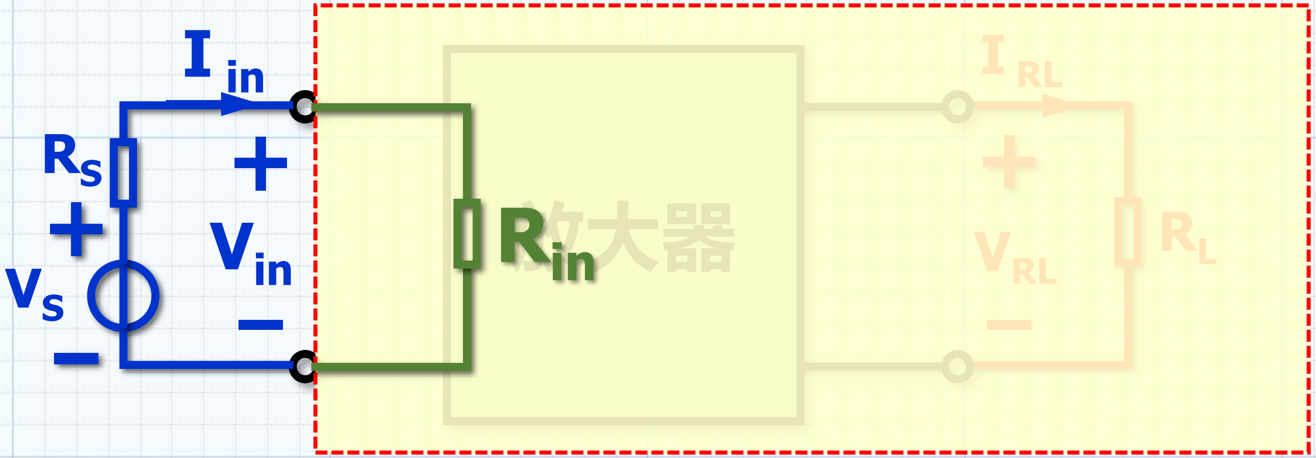
常见计算：A R_i R_o f_H …

作图、仿真、等效、估算

交流通道+微扰等效

1. 直流源 ➔ 零
2. 大C➔短； 大L➔断
3. 放大器件 ➔ 微扰模型
4. 求解线性电路

阻抗：输入端

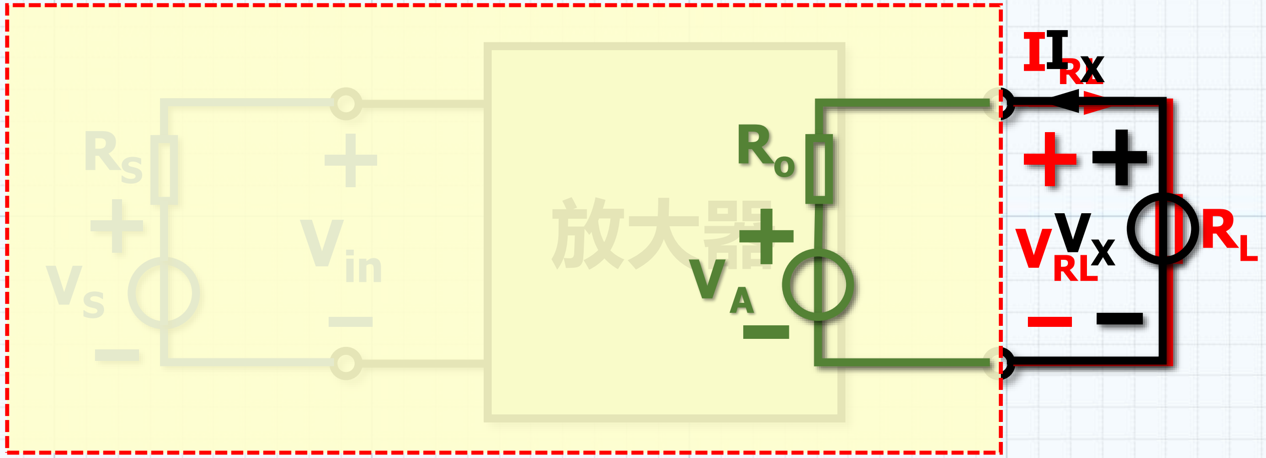


- 增益计算式一般包含源内阻 R_S： R_S 变化 → A 变化
- 放大器和负载的等效电路： R_{in} 一般随 R_L 而变
- 计算方法（之一）

算出 V_{in} 和 I_{in}，相除即可

与 R_S 无关 → 计算时是否令 R_S=0 均可

阻抗：输出端



- 增益计算式中一般包含负载 R_L： R_L 变化 → A 变化
- 源和放大器的等效电路： 戴文宁定理：U_A 串联 R_O
- 计算方法（之一）

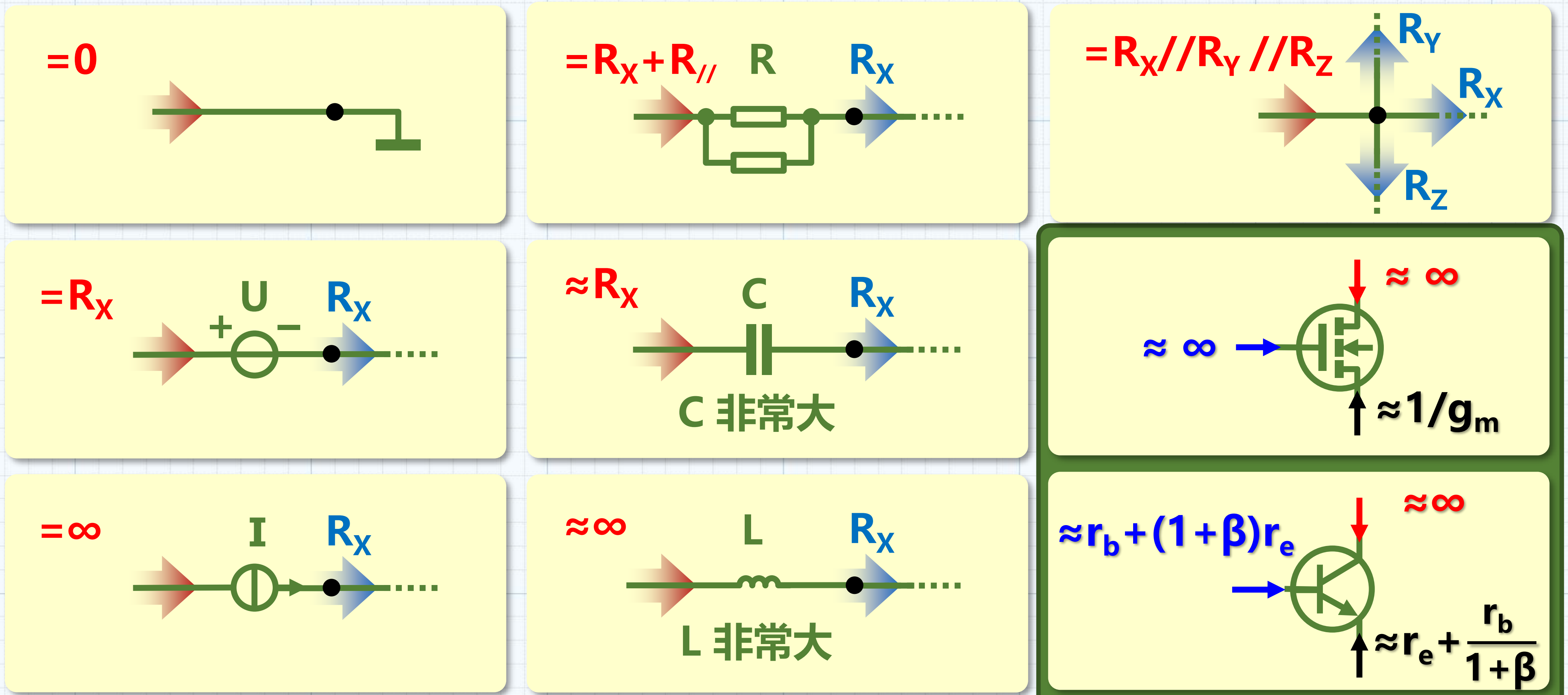
令 $R_L=\infty$ 时，计算 V_{RL} 即为 V_A

令 $R_L=0$，计算 I_{RL}，则 $R_o= V_A/I_{RL}$

- 计算方法（之二）

令 $U_A=0$，设源 V_X，算 I_X，则 $R_o= V_X/I_X$

阻抗：极速估算



均假设：其它端接地！

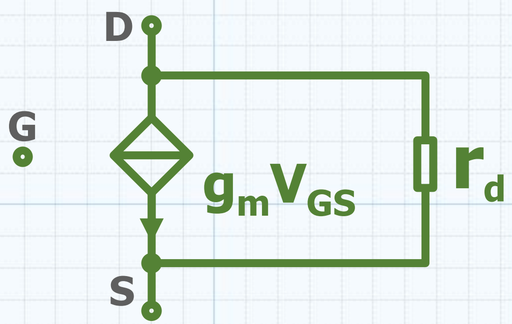
否则，需做少许代换

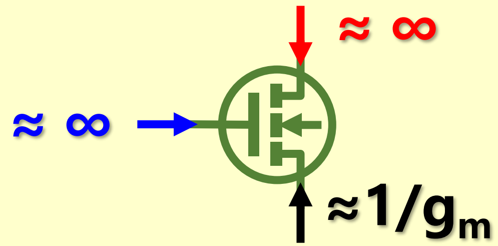
阻抗：FET 三端电阻

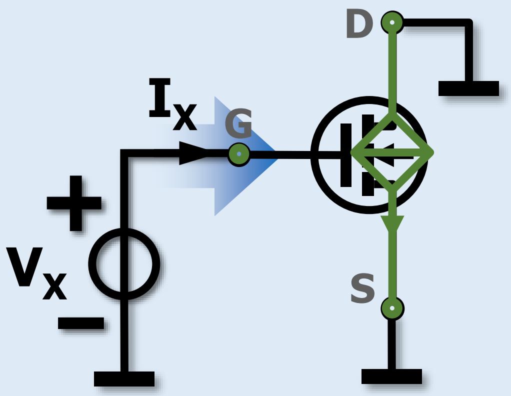
均假设：其它端接地！

FET 小信号模型

- r_d ： 100KΩ 数量级
- 若外部 R 较小 → $r_d \approx \infty$

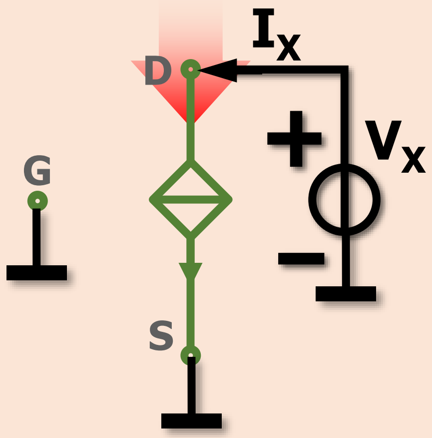






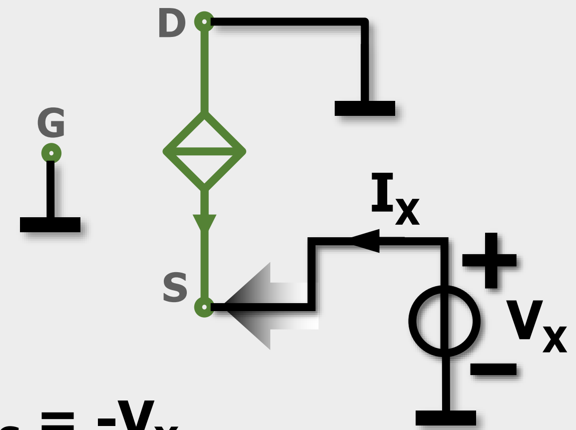
$I_G \equiv 0$

$R_{GEQ} = V_x / I_x \approx \infty$



$V_{GS} \equiv 0$ ➔ $I_D \equiv 0$

$R_{DEQ} = V_x / I_x \approx \infty$



$V_{GS} = -V_X$

$I_D = -g_m V_X$ ➔ $I_X = g_m V_X$

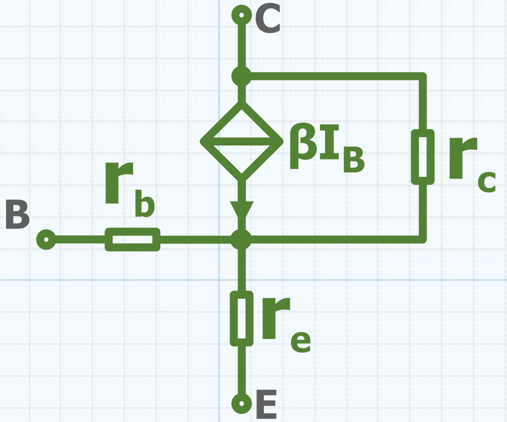
$R_{DEQ} = V_x / I_X \approx 1/g_m$

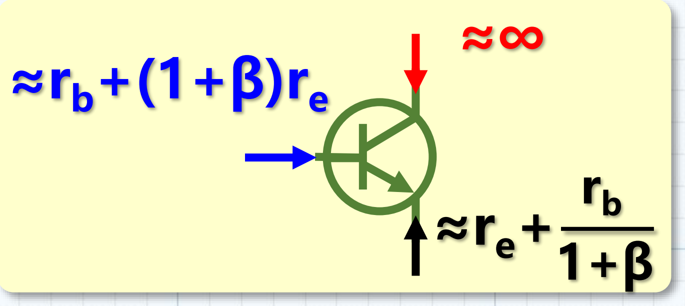
阻抗：BJT 三端电阻

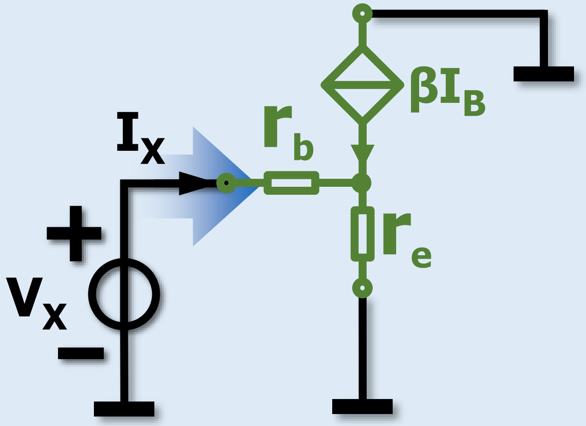
均假设：其它端接地！

BJT 小信号模型（T 形）

- r_c：100KΩ 数量级
- 若外部 R 较小 → $r_c \approx \infty$



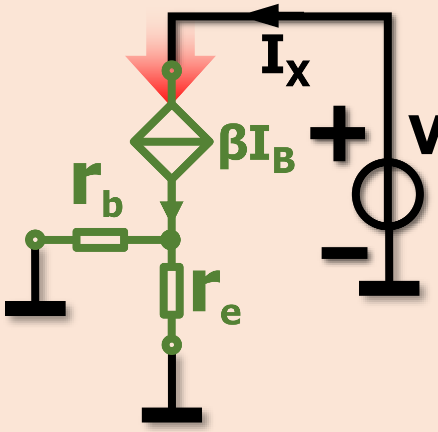




$I_E = (1+\beta)I_X$

$V_X = V_{rb}+V_{re}$

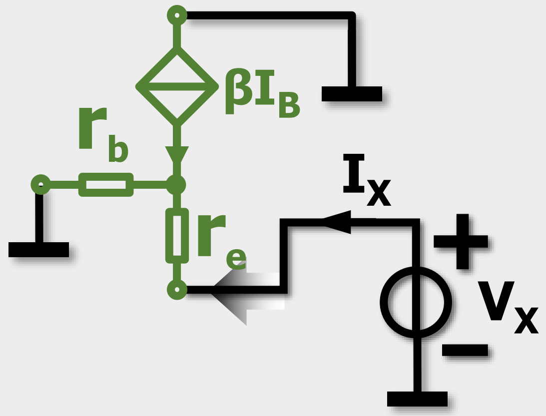
$= I_X r_b+(1+\beta)I_X r_e$



$I_E=(1+\beta)I_B$

但 I_B 和 I_E 方向反向

$I_B = I_E \equiv 0$ → $I_c \equiv 0$

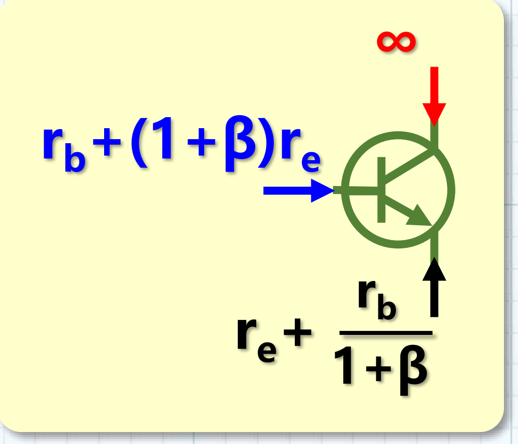


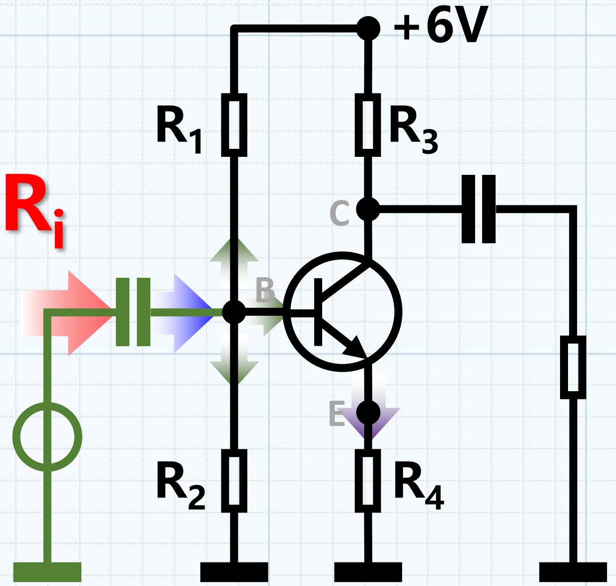
$I_B = -I_X/(1+\beta)$

$V_X = V_{re} + V_{rb}$

$= I_X r_e + I_X r_b/(1+\beta)$

阻抗：示例 1





① 经过C：直通

② 遇岔路：分头计算

③ 下：经R_2 到地

④ 上：经R_1 到交流地

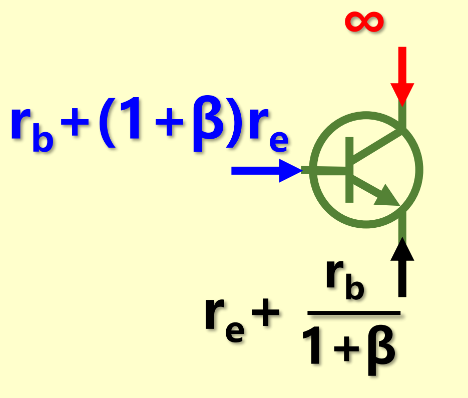
⑤ 右：BJT 基极

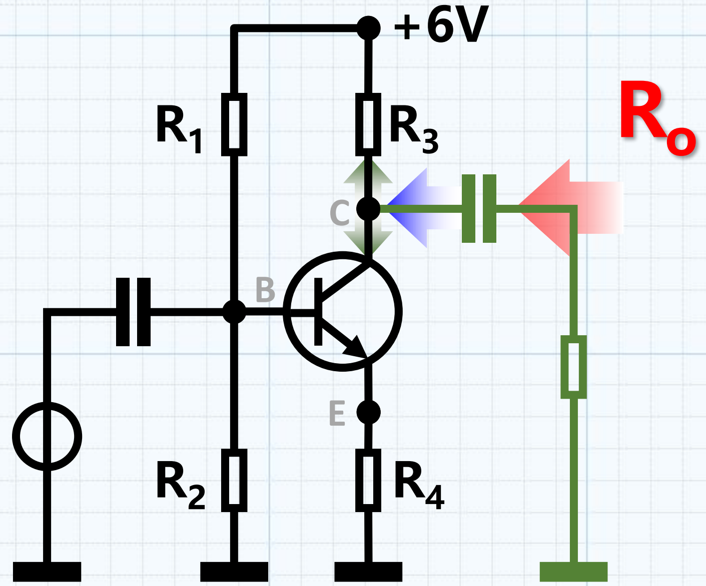
⑥ 射极外：经 R_4 到地

$$R_i = 0 + R_{\text{电容右侧}} = R_{\text{下}} // R_{\text{上}} // R_{\text{右}}$$

$$R_i = 0 + R_2 // R_1 // r_b + (1+\beta)(r_e+R_4)$$

阻抗：示例 1





① 经过C：直通

② 遇岔路：分头计算

③ 上：经 R_3 到 交流地

④ 下：BJT 集电极

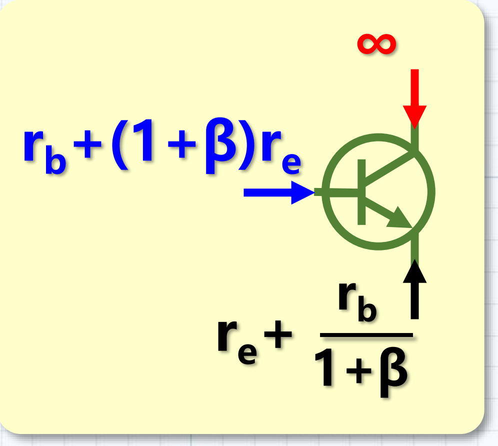
R_o = 0 + $R_{电容左侧}$

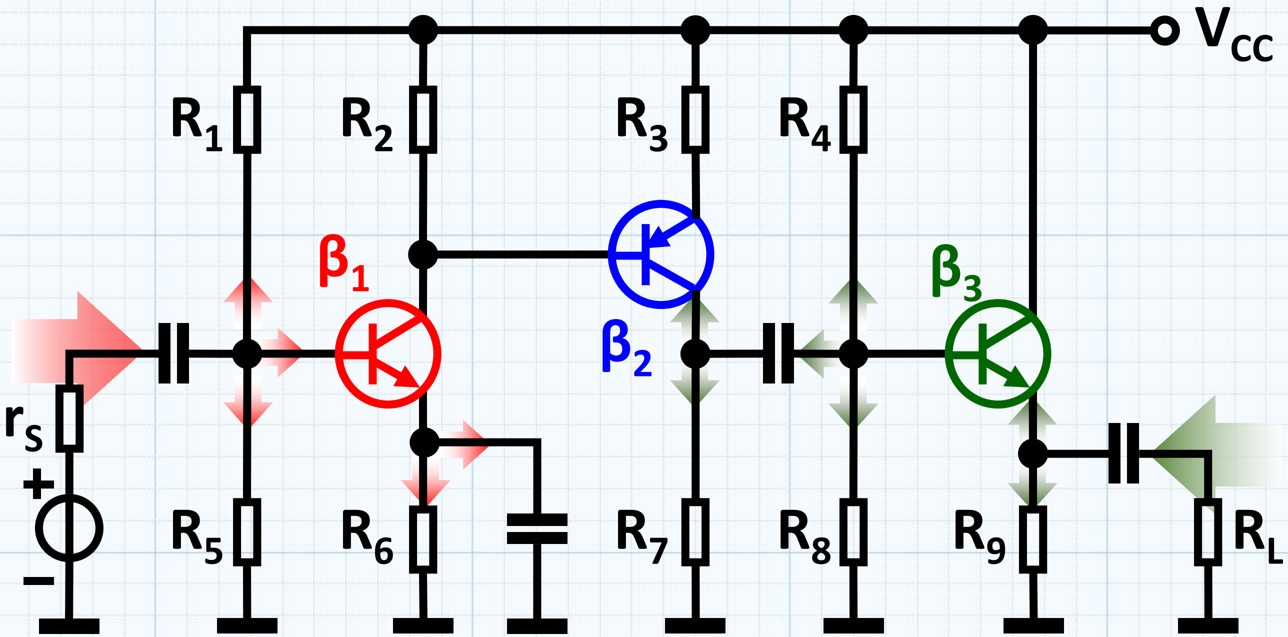
$R_上 // R_下$

$R_3 // \infty$

阻抗：示例 2

$$R_i = 0 + R_5 // R_1 // \{r_{b1} + [r_{e1} + (\ R_6 // 0\ )] \cdot (1+\beta)\}$$





$$R_o = 0 + R_9 // \{r_{e3} + [r_{b3} + (\ R_8 // R_4 // (R_7 // \infty)\ )] / (1+\beta)\}$$