电子电路基础

何松柏

电子工程学院

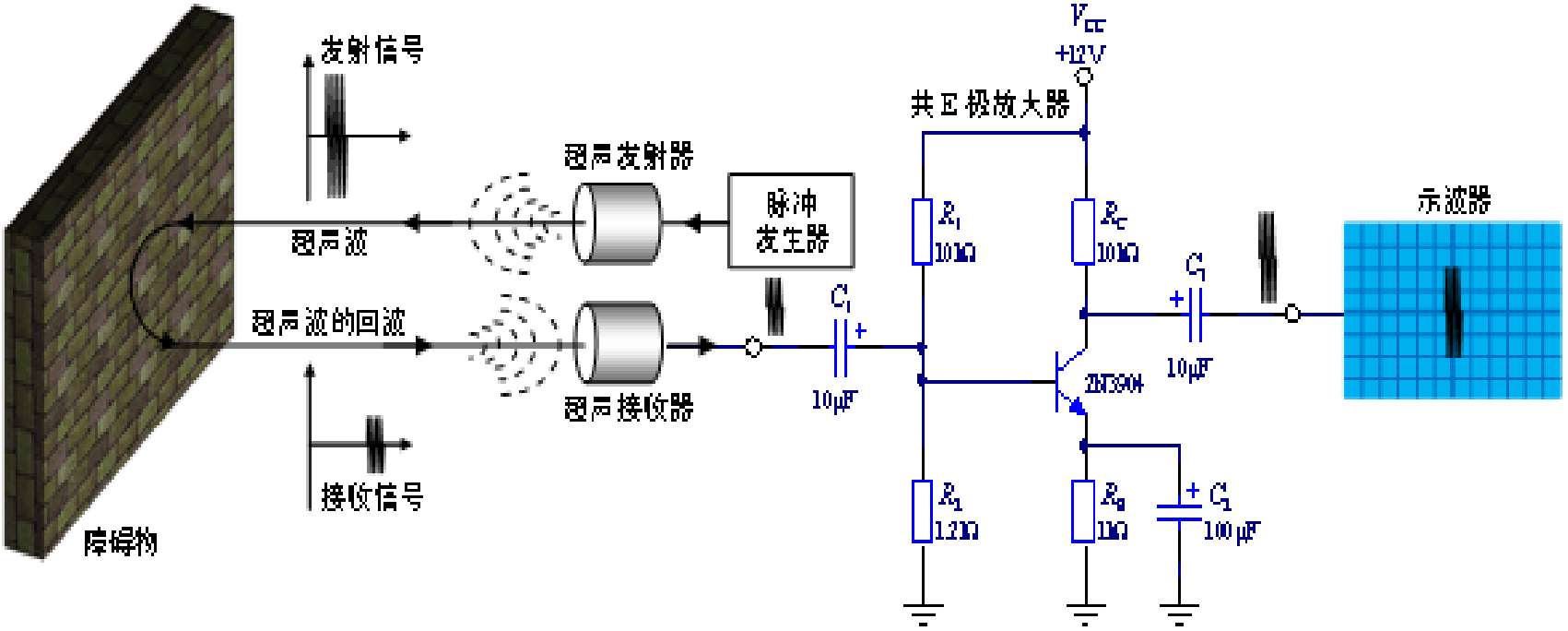
sbhe@uestc.edu.cn

UESTC

Analog Circuits

基本放大电路及分析

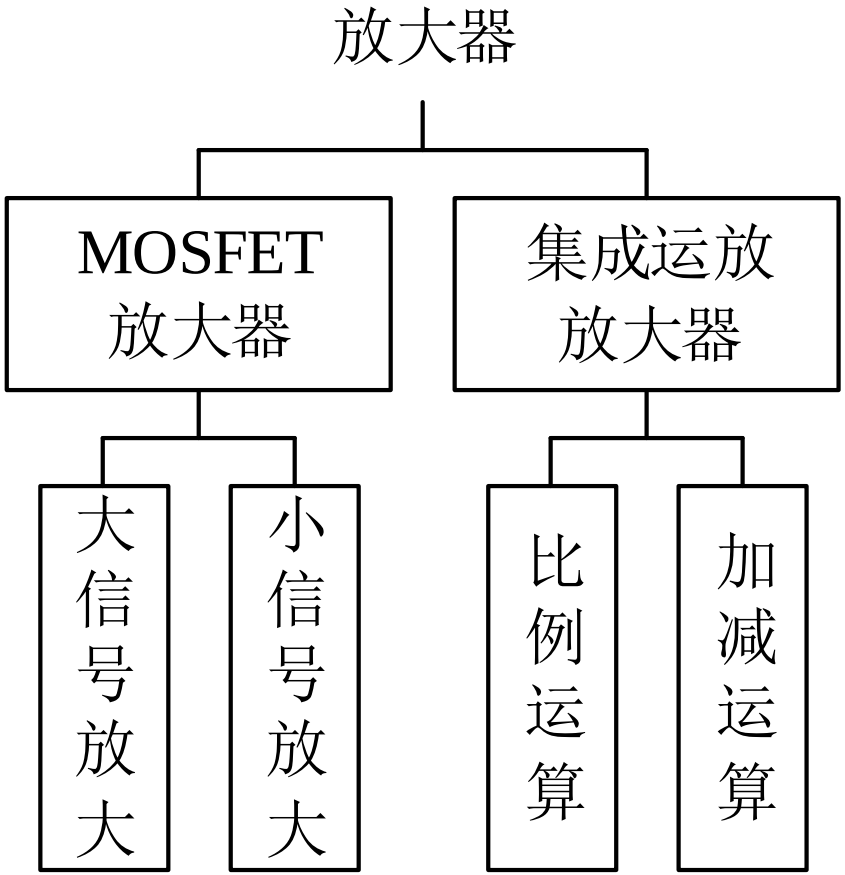
问题引入



基本放大电路及分析

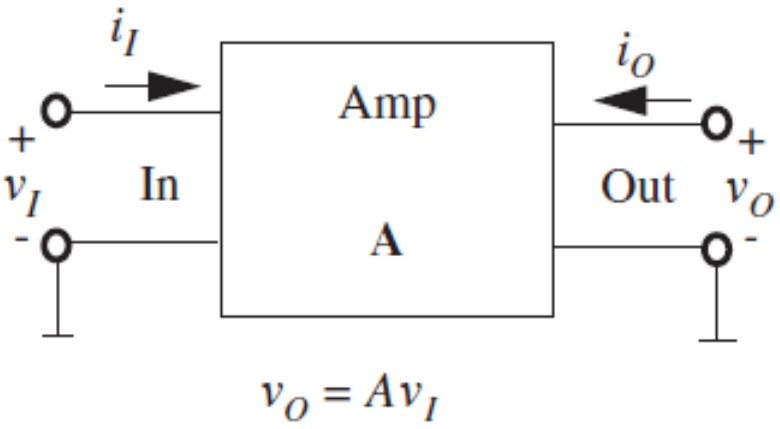
- 放大电路基本概念
- MOSFET基本放大器
- 放大器的大信号分析
- 放大器的小信号分析

基本放大电路及分析



MOSFET放大器的小信号分析

◆ 典型放大器等效表示

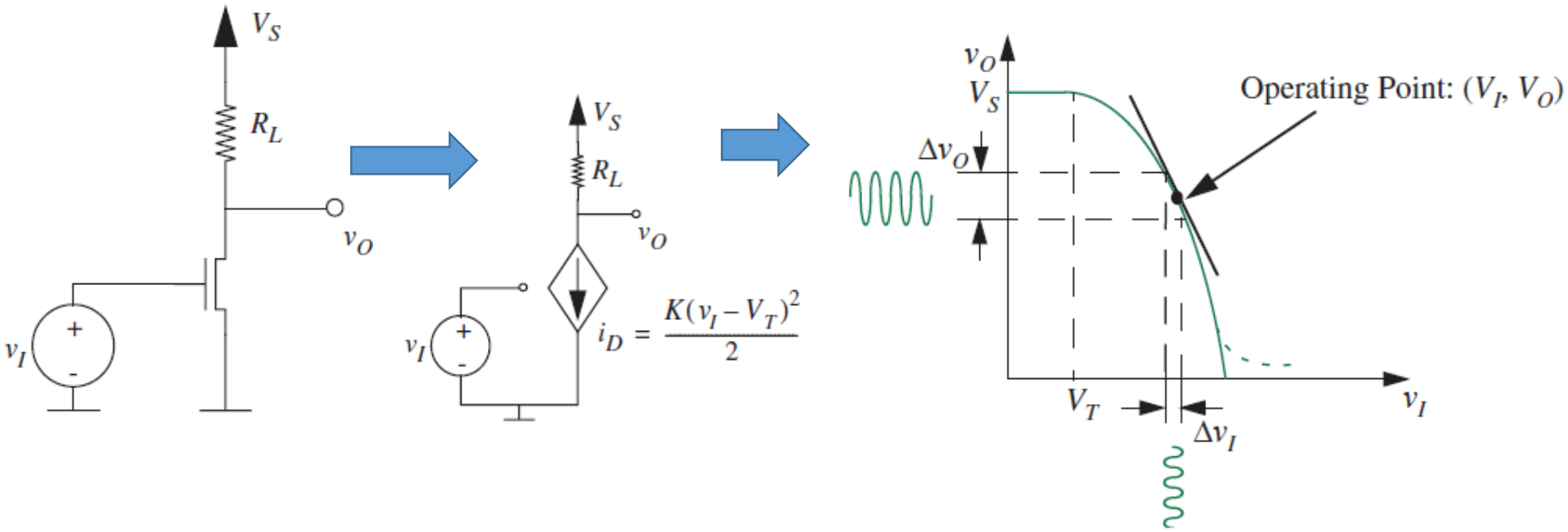


- 二端口网络
- 线性增益（与前面矛盾？）
- 关心哪些特性？

（1）输入电阻—从信号源获取能力
（2）输出电阻—带负载能力
（3）增益---放大能力

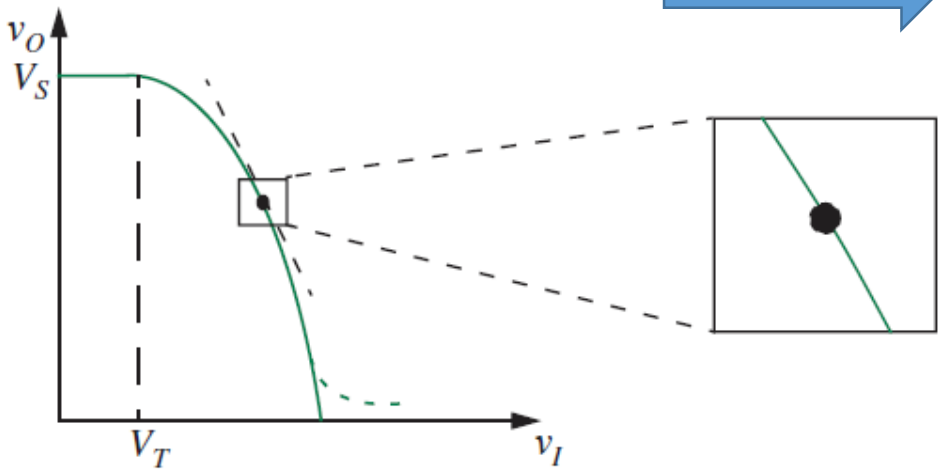
MOSFET放大器的小信号分析

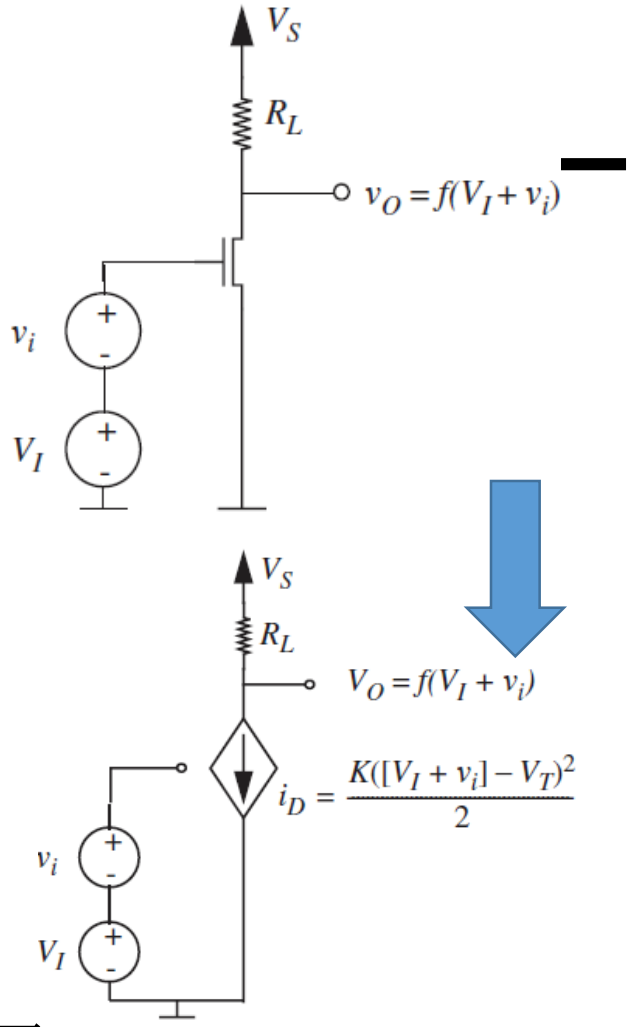
◆ 实际放大器



MOSFET放大器的小信号分析

◆ 小信号模型

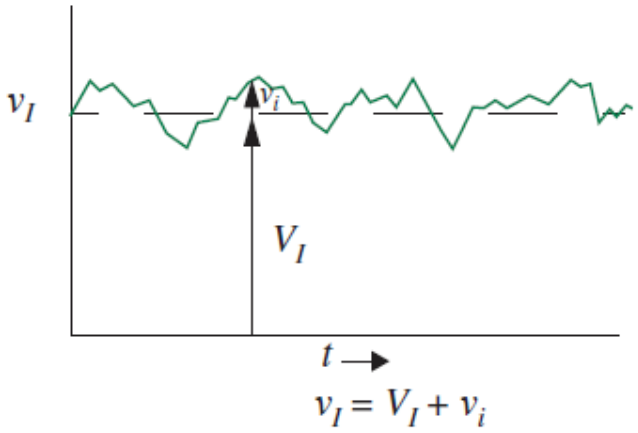


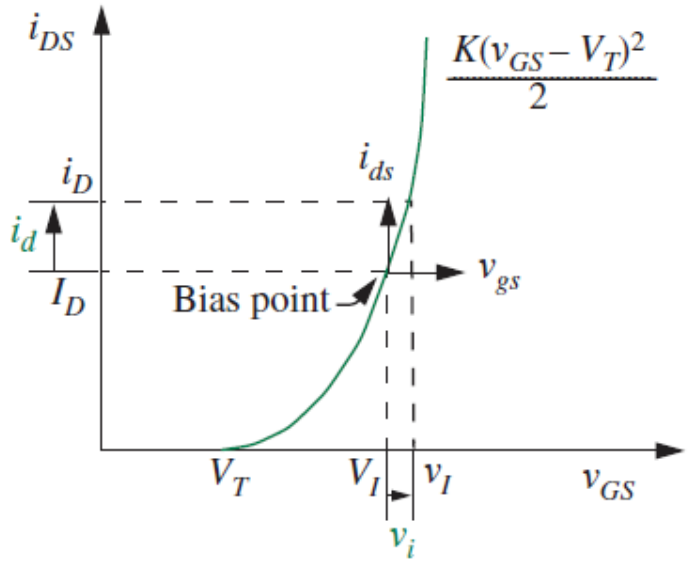


与大信号研究对象是有区别的，有什么不同？

MOSFET放大器的小信号分析

◆小信号模型





$$i_D = f(V_I + v_i) = I_D + i_d = \frac{K([V_I + v_i] - V_T)^2}{2}$$

MOSFET放大器的小信号分析

◆泰勒级数展开（增量分析法）

$$y = f(x) = f(X_o) + \left.\frac{df}{dx}\right|_{Xo}(x - X_o) + \frac{1}{2!}\left.\frac{d^2f}{dx^2}\right|_{Xo}(x - X_o)^2 + \cdots$$

$$i_D = f(V_I + v_i) = \frac{K[(V_I + v_i) - V_T]^2}{2}$$

$$= \frac{K(V_I - V_T)^2}{2} + K(V_I - V_T)v_i + \frac{K}{2}v_i^2.$$

$$i_D \approx \frac{K(V_I - V_T)^2}{2} + K(V_I - V_T)v_i$$

增量信号足够小，忽略平方及高阶项

MOSFET放大器的小信号分析

◆ 小信号分析

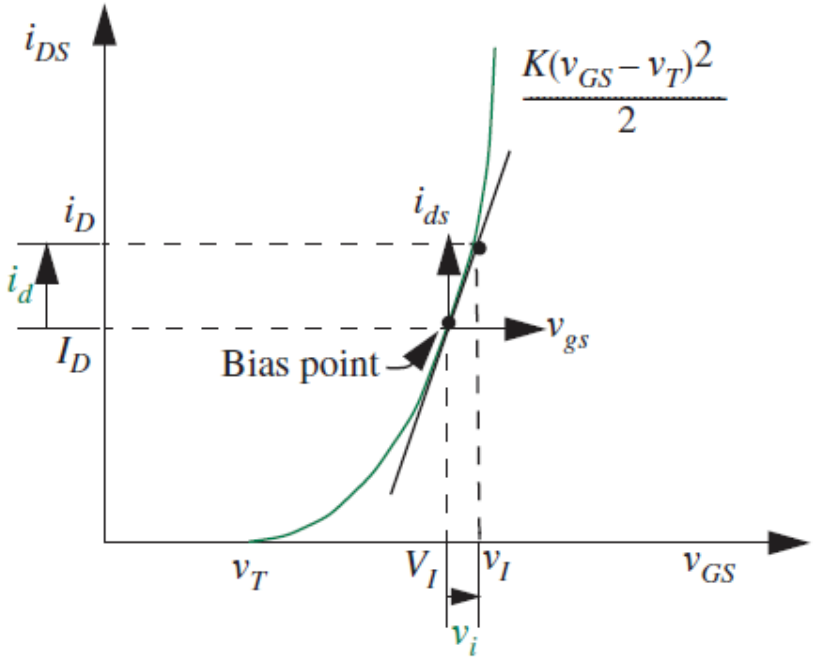
$$i_D \approx \frac{K(V_I - V_T)^2}{2} + K(V_I - V_T)v_i$$

$$I_D = \frac{K(V_I - V_T)^2}{2}$$

直流项（工作点）

$$i_d = K(V_I - V_T)v_i$$

增量（小信号）关系



MOSFET放大器的小信号分析

◆ 增量跨导

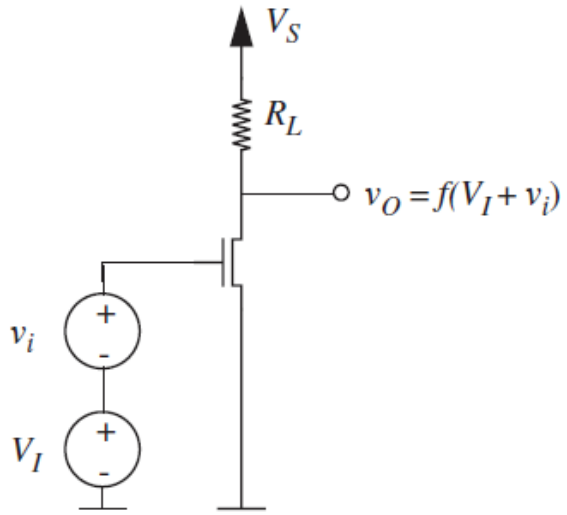
$$g_m = K(V_{GS} - V_T).$$

$$i_d = g_m v_i$$

注意：增量跨导与工作点有关吗？

MOSFET放大器的小信号分析

◆ 小信号放大器电压增益



$$v_O = V_S - i_D R_L$$

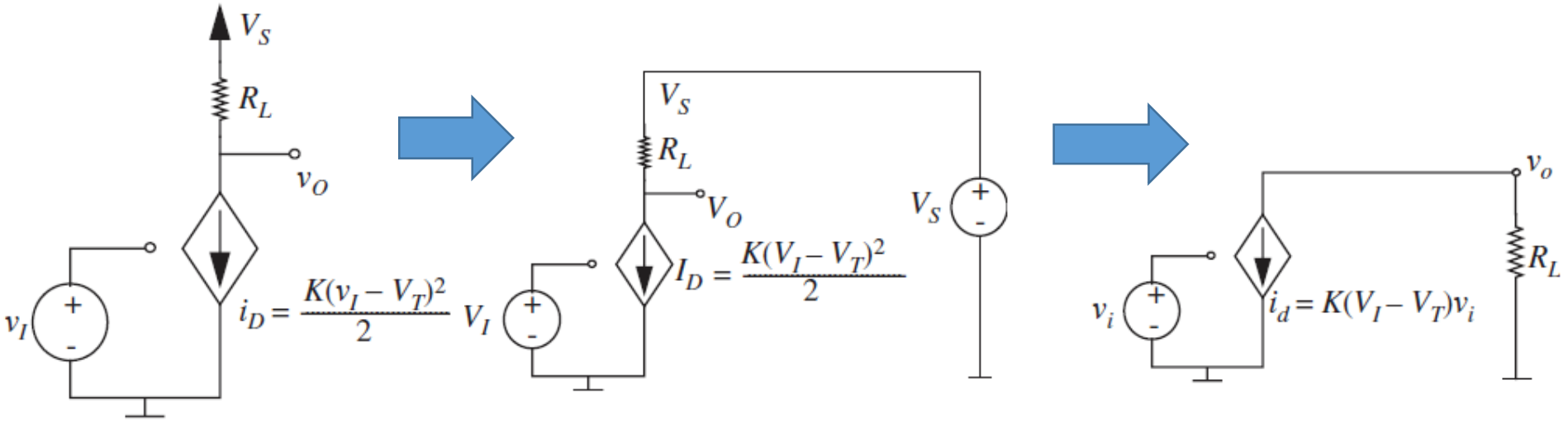
$$\begin{aligned} V_O + v_o &= V_S - (I_D + i_d)R_L \\ &= V_S - I_D R_L - i_d R_L \end{aligned}$$

$$\text{Small signal gain} = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_L = A.$$

注意：小信号放大器电压增益取决于工作点的选择！

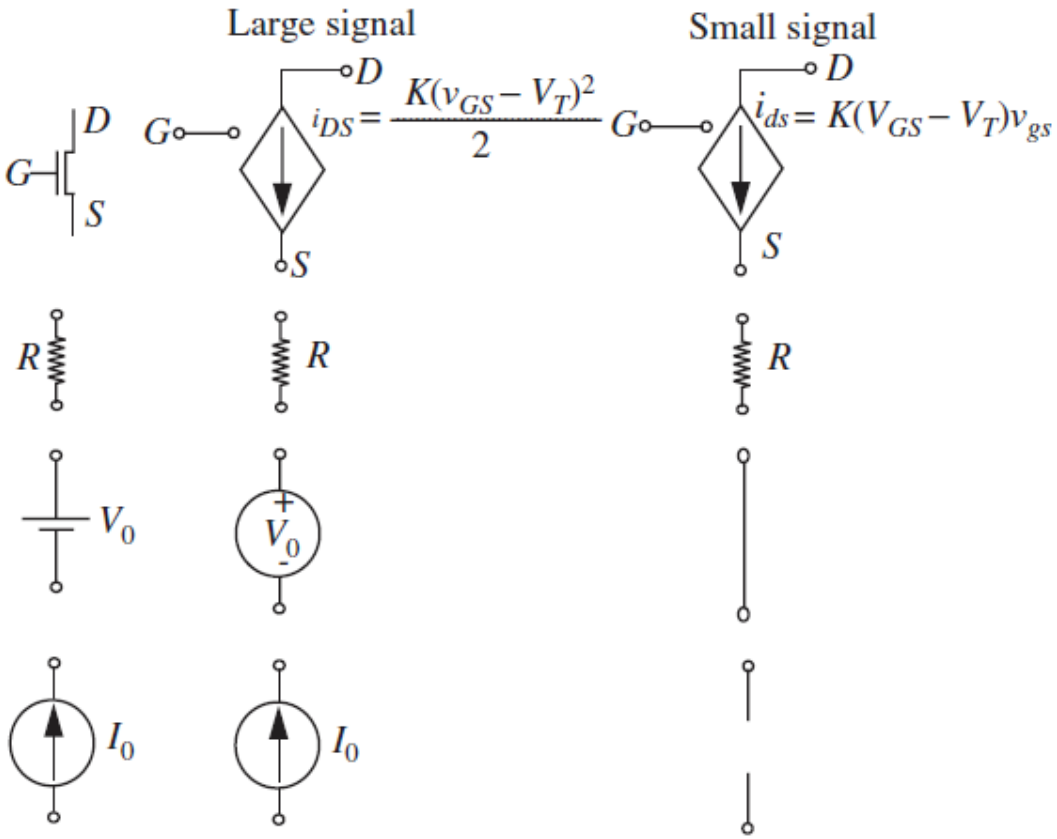
MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET放大器的小信号电路



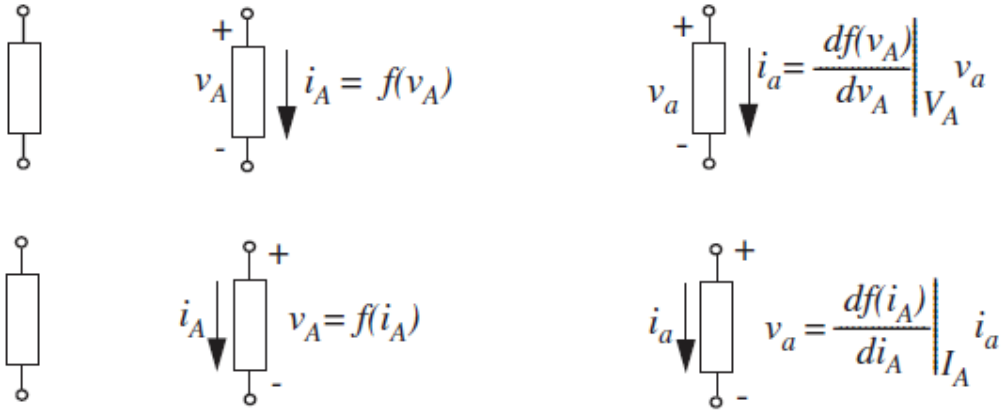
MOSFET放大器的小信号分析

◆ 小信号电路表示



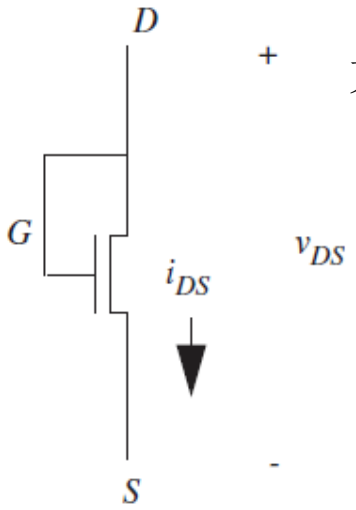
MOSFET放大器的小信号分析

◆ 小信号电路表示



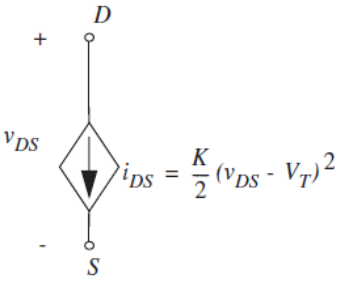
MOSFET放大器的小信号分析

◆ 例8.1 研究在集成电路等 如何实现大电阻值？



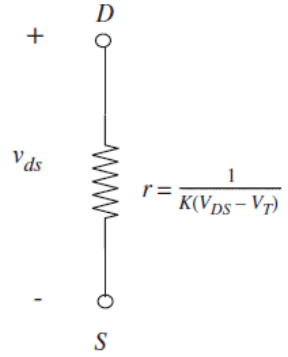
大信号

$$i_{DS} = K\frac{(v_{GS} - V_T)^2}{2}.$$



小信号

$$i_{ds} = \left.\frac{di_{DS}}{dv_{DS}}\right|_{V_{DS}} v_{ds}$$
$$= K(v_{DS} - V_T)\big|_{V_{DS}} v_{ds}$$
$$= K(V_{DS} - V_T)v_{ds}.$$



MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET小信号模型导出

根据电源及电路拓扑结构确定工作点

↓

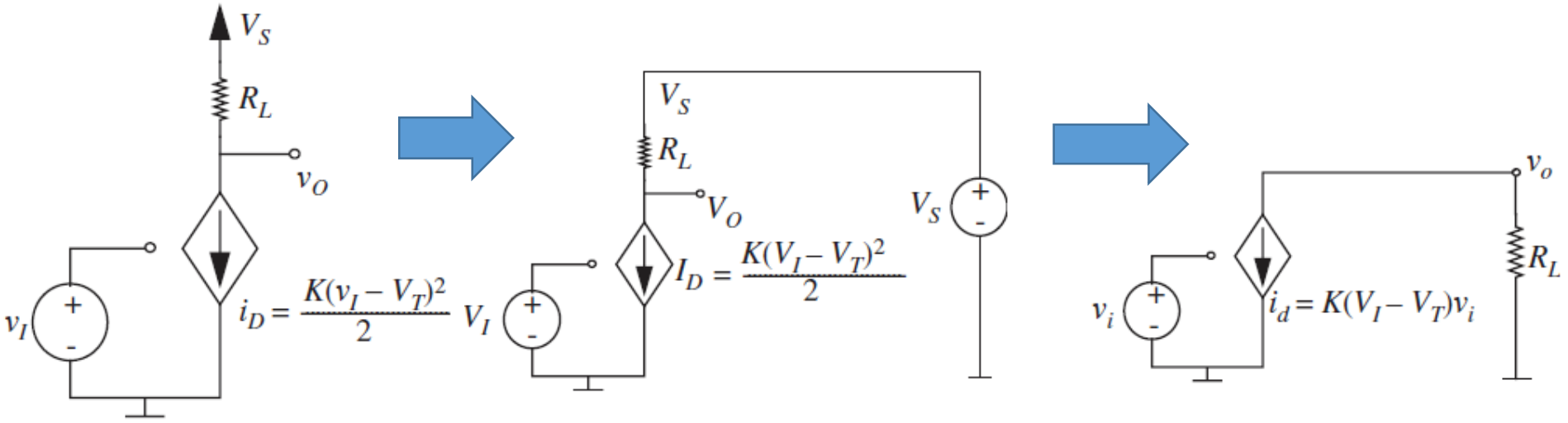
根据元件线性化的小信号性质，选择线性元件表示

↓

用线性化元件替代原始元件，得到线性电路网络

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET放大器的小信号电路

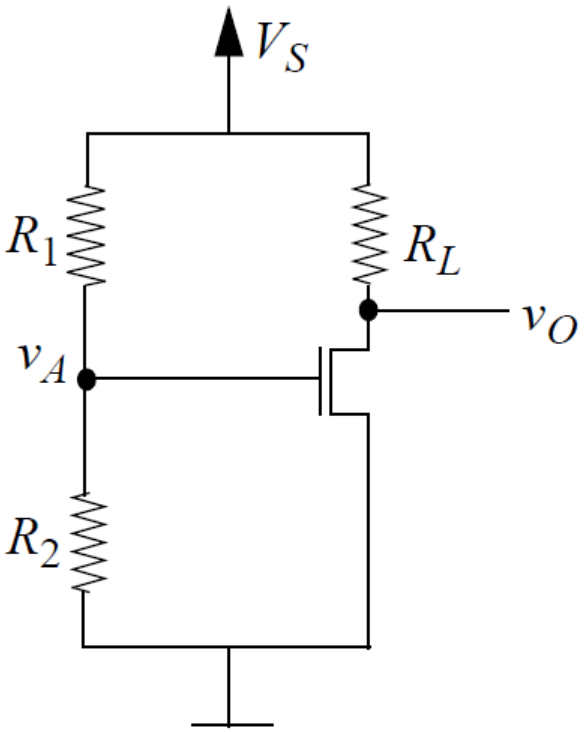


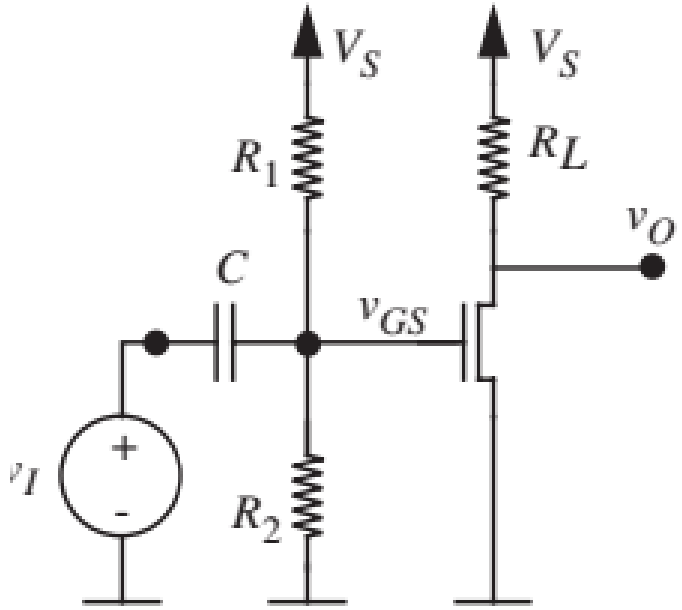
MOSFET放大器的小信号分析

◆ 讨论：小信号放大电路工作点的选择？

在小信号放大器中，“增益”是较重要的性能指标，与放大器工作点有什么关系？

MOSFET放大器的工作点设置典型电路

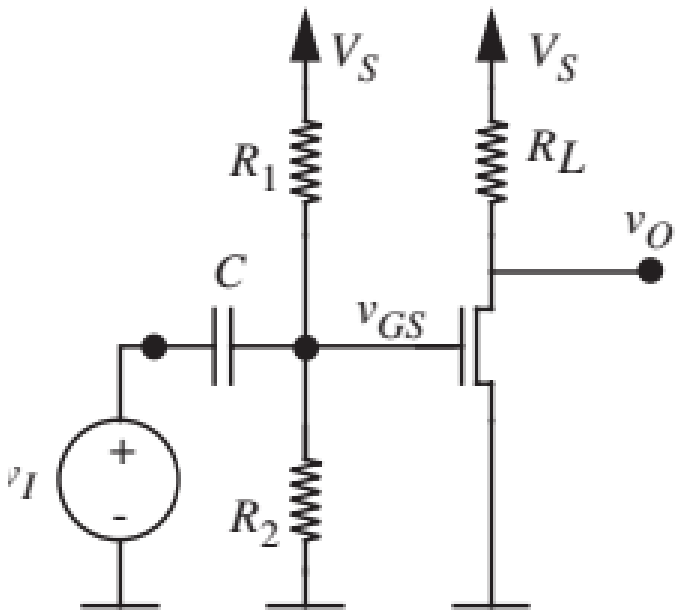




主观题 10分

设置

给出小信号等效电路



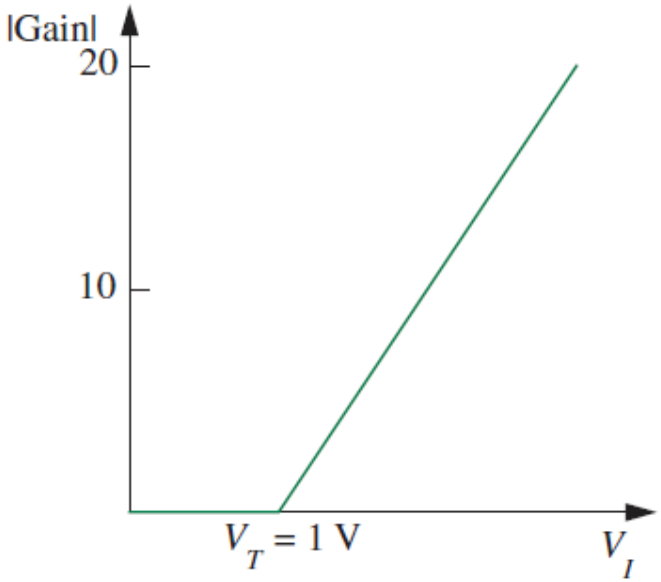
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

MOSFET放大器的小信号分析

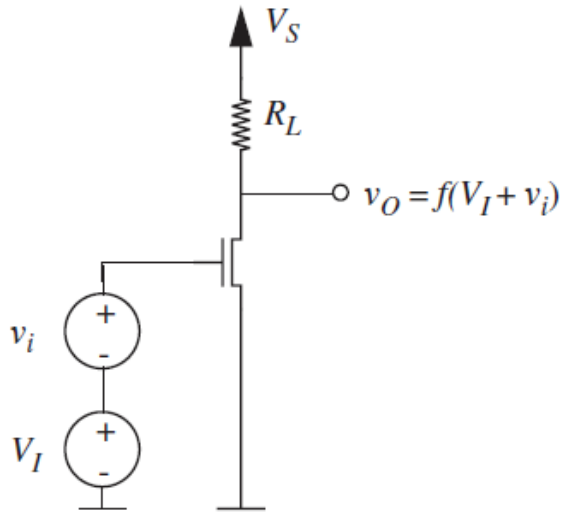
◆小信号放大电路工作点的选择

放大器小信号增益 $\left|\frac{v_o}{v_i}\right| = K(V_I - V_T)R_L.$



MOSFET放大器的小信号分析

◆ 例



放大器参数

$$V_S = 10\ \text{V}$$

$$K = 1\ \text{mA/V}^2$$

$$R_L = 10\ \text{k}\Omega$$

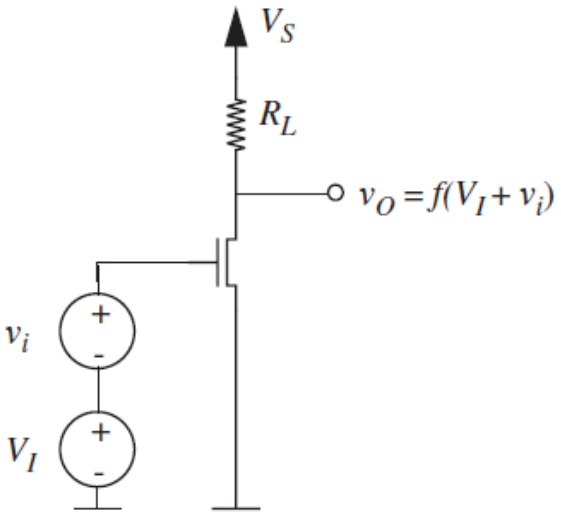
$$V_T = 1\ \text{V}$$

(1) 要求增益12，输入工作点电压是？
(2) 该放大器工作在放大状态输入正弦信号最大峰峰值电压？

主观题 10分

设置

例：电路如图



放大器参数

$V_S = 10\ \text{V}$

$K = 1\ \text{mA/V}^2$

$R_L = 10\ \text{k}\Omega$

$V_T = 1\ \text{V}$

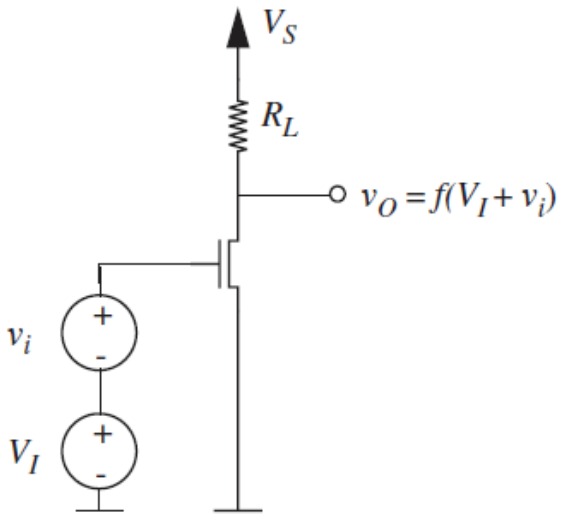
(1) 要求增益12，输入工作点电压是？
(2) 该放大器工作在放大状态输入正弦信号最大峰峰值电压？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

MOSFET放大器的小信号分析

◆分析



放大器参数

$$V_S = 10\ \text{V}$$

$$K = 1\ \text{mA/V}^2$$

$$R_L = 10\ \text{k}\Omega$$

$$V_T = 1\ \text{V}$$

输入电压范围

$$V_T \rightarrow -1 + \sqrt{1 + 2V_S R_L K}/R_L K + V_T.$$

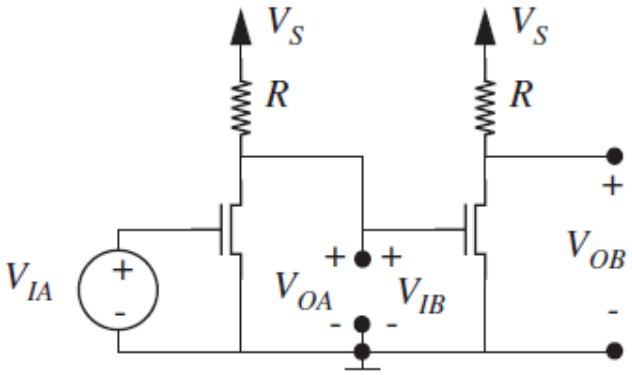
(1) 要求增益12，输入工作点电压是？ VI=2.2V

(2) 该放大器工作在放大状态输入正弦信号最大峰峰值电压？

有效范围是1-2.32V， 最大峰峰值0.24V.

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET放大器级联工作点选择



直接耦合（集成电路中常用）

$$V_S = 10\ \text{V}$$

$$K = 1\ \text{mA/V}^2$$

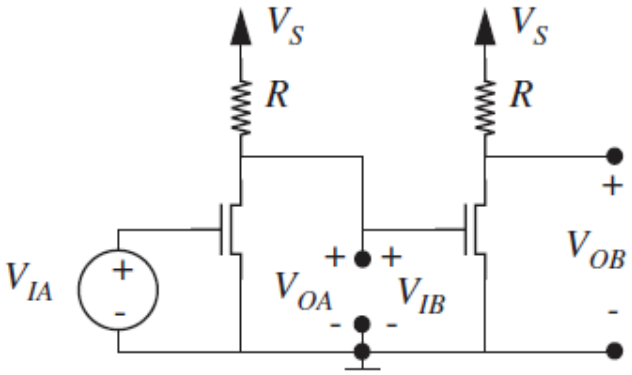
$$R = 10\ \text{k}\Omega$$

$$V_T = 1\ \text{V}$$

设第1级增益为12，问该电路存在什么问题？
如何解决该问题，有什么措施？

设置

如何正确设计电路?



$$V_S = 10\ \text{V}$$

$$K = 1\ \text{mA/V}^2$$

$$R = 10\ \text{k}\Omega$$

$$V_T = 1\ \text{V}$$

设第1级增益为12，问该电路存在什么问题？
如何解决该问题，有什么措施？

作答

MOSFET放大器的小信号分析

◆分析

(1) 要求增益12，第1级输出为

$$V_{OA} = V_S - \frac{K}{2}(V_{IA} - V_T)^2 R$$

$$= 10 - \frac{1 \times 10^{-3}}{2}(2.2 - 1)^2 10 \times 10^3$$

$$= 2.8 \text{ V}.$$

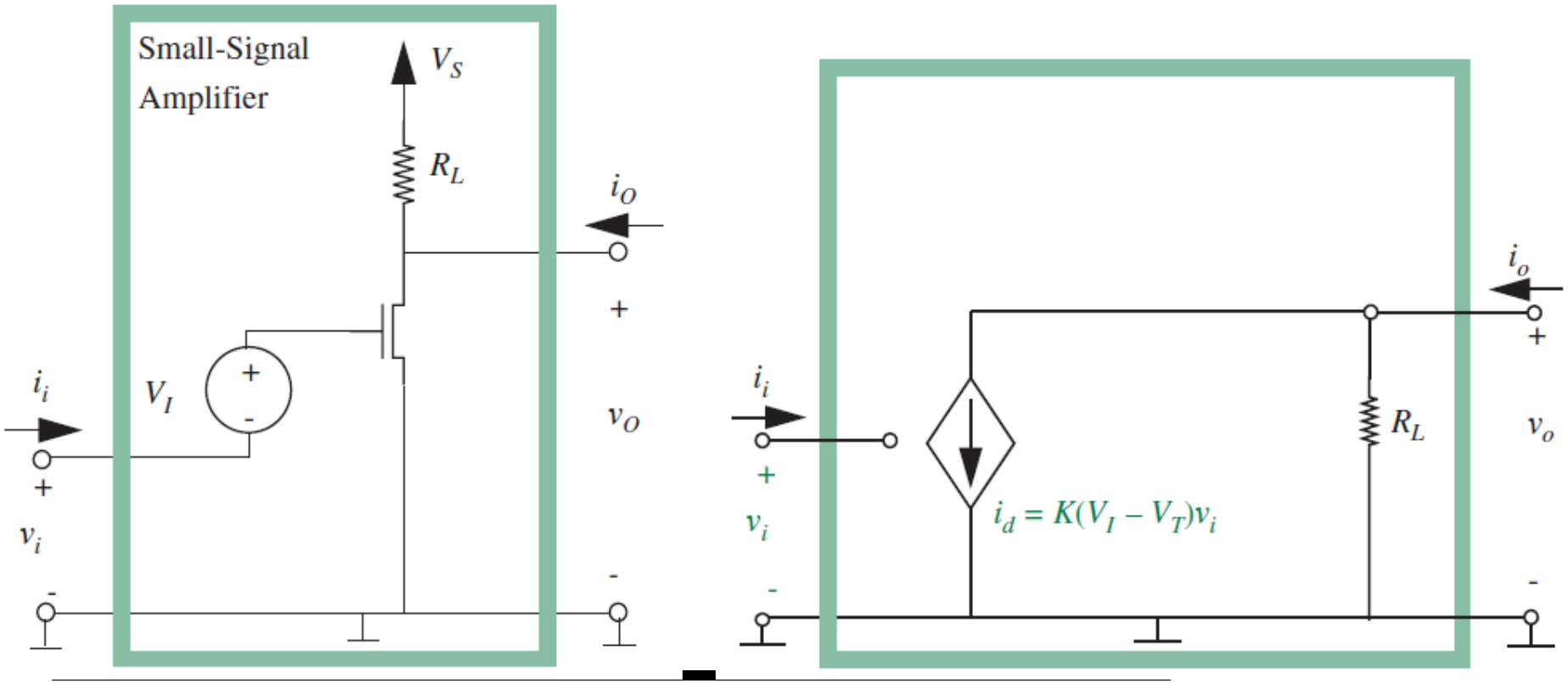
（2）第2级有效输入范围1-2.32V

$$V_T \rightarrow -1 + \sqrt{1 + 2V_S R_L K}/R_L K + V_T.$$

解决方案：降低第1级输出，增大输入，或增大R，方法缺点是什么？

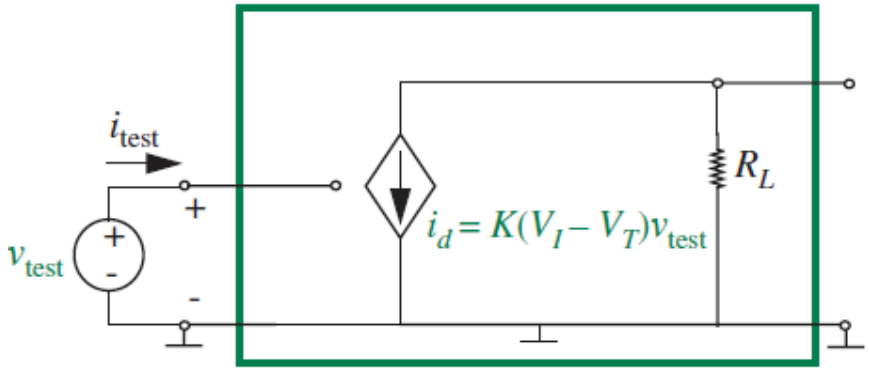
MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET小信号放大器输入电阻



MOSFET放大器的小信号分析

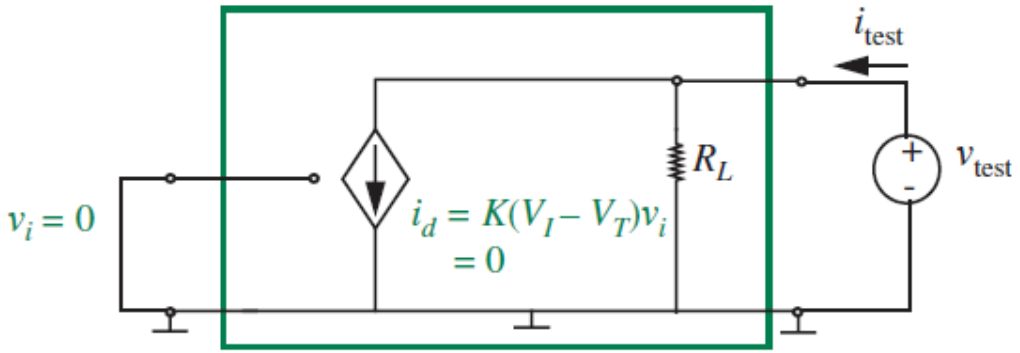
◆ MOSFET小信号放大器输入电阻



$$r_i = \frac{v_{\text{test}}}{i_{\text{test}}} = \frac{v_{\text{test}}}{0} = \infty.$$

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET小信号放大器输出电阻



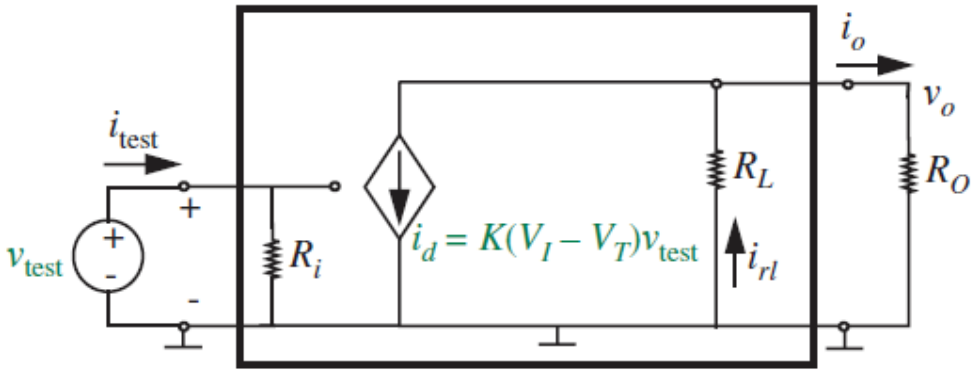
$$r_{out} = \frac{v_{test}}{i_{test}} = R_L.$$

注意这里电阻的位置（偏置电阻）

问题：输出电阻与后面连接电路的输入电阻有关吗？

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET小信号放大器电流增益



$$\text{Current gain} = \frac{i_o}{i_{\text{test}}}.$$

$$\text{Current gain} = \frac{\frac{v_o}{R_O}}{\frac{v_{\text{test}}}{R_i}}$$

$$= \frac{v_o}{v_{\text{test}}}\frac{R_i}{R_O}.$$

$$\text{Current gain} = -K(V_I - V_T)(R_L \| R_O)\frac{R_i}{R_O}.$$

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET小信号放大器功率增益

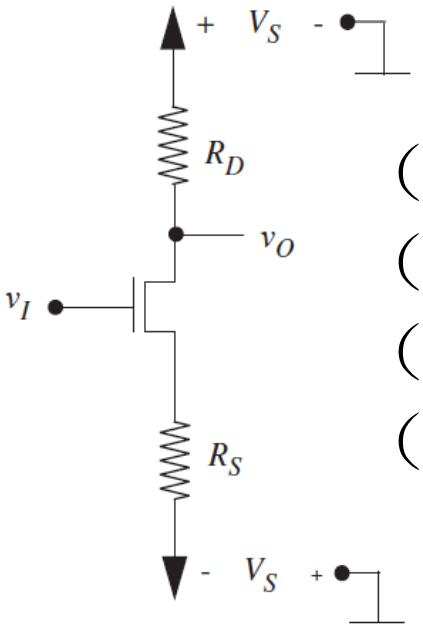
$$\text{Power gain} = \frac{v_o i_o}{v_{\text{test}} i_{\text{test}}} = \frac{v_o}{v_{\text{test}}} \frac{i_o}{i_{\text{test}}}.$$

$$\begin{aligned}
\text{Power gain} &= \frac{v_o}{v_{\text{test}}} \frac{i_o}{i_{\text{test}}} \\
&= [-K(V_I - V_T)(R_L \| R_O)] \left[-K(V_I - V_T)(R_L \| R_O) \frac{R_i}{R_O} \right] \\
&= [K(V_I - V_T)(R_L \| R_O)]^2 \frac{R_i}{R_O}.
\end{aligned}$$

主观题 10分

设置

电路如图，MOSFET工作于饱和区域，参数为V_T和K。



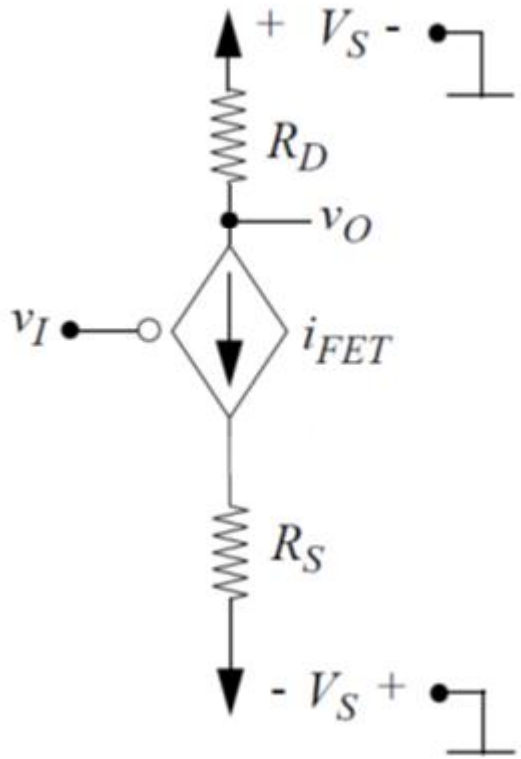
（1）给出SCS等效电路
（2）给出输入输出工作点电压电路关系
（3）小信号模型
（4）小信号电压增益，输入电阻，输出电阻

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

（1）



分析

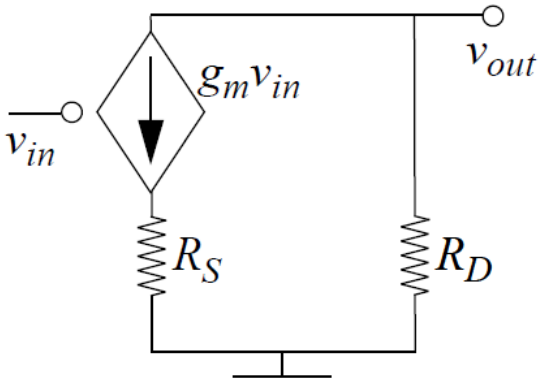
（2）

$$I_{\mathrm{D}} = \frac{1}{RS}(V_{\mathrm{IN}} + V_{\mathrm{S}} - V_{\mathrm{T}}) + \frac{1}{KR_{\mathrm{S}}^2} - \sqrt{\frac{2}{KR_{\mathrm{S}}^3}(V_{\mathrm{IN}} + V_{\mathrm{S}} - V_{\mathrm{T}}) + \frac{1}{K^2R_{\mathrm{S}}^4}}.$$

$$V_{\mathrm{OUT}} = V_{\mathrm{S}} - \frac{R_{\mathrm{D}}}{KR_{\mathrm{S}}^2} + \frac{R_{\mathrm{D}}}{R_{\mathrm{S}}}(V_{\mathrm{I}} - V_{\mathrm{T}} + V_{\mathrm{S}}) - \sqrt{\frac{2R_{\mathrm{D}}^2}{KR_{\mathrm{S}}^3}(V_{\mathrm{IN}} + V_{\mathrm{S}} - V_{\mathrm{T}}) + \frac{R_{\mathrm{D}}^2}{K^2R_{\mathrm{S}}^4}}.$$

分析

（3）



$$g_{\mathrm{m}} = \frac{dI}{dV_{\mathrm{IN}}} = \frac{1}{R_{\mathrm{S}}} + \left(2KR_{\mathrm{S}}^3[V_{\mathrm{IN}} + V_{\mathrm{S}} - V_{\mathrm{T}}] + R_{\mathrm{S}}^2\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

分析

（4）

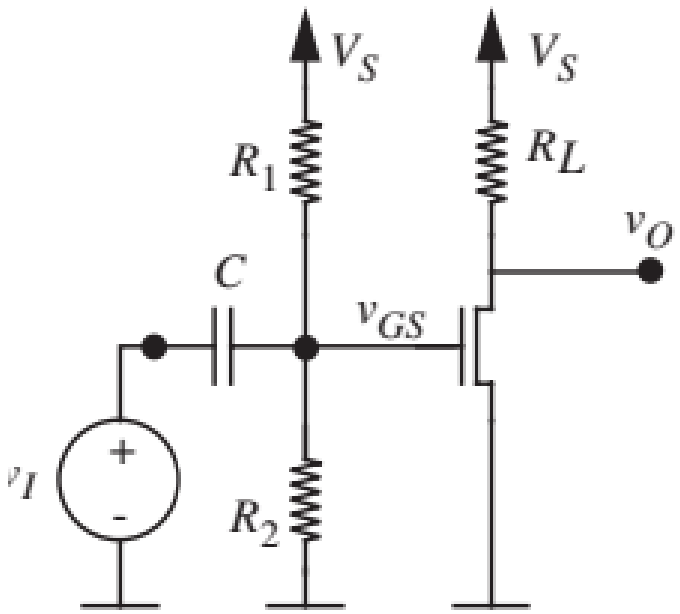
$$\frac{dV_{\mathrm{OUT}}}{dV_{\mathrm{IN}}} = \frac{R_{\mathrm{D}}}{R_{\mathrm{S}}} - \left(\frac{2KR_{\mathrm{S}}^3}{R_{\mathrm{D}}^2}[V_{\mathrm{IN}} + V_{\mathrm{S}} - V_{\mathrm{T}}] + \frac{R_{\mathrm{S}}^2}{R_{\mathrm{D}}^2} \right)^{-\frac{1}{2}}.$$

$$R_{\mathrm{OUT}} = \frac{v_{\mathrm{test}}}{i_{\mathrm{test}}} = R_{\mathrm{D}}.$$

主观题 10分

设置

给出小信号等效电路，增益、输入输出电阻

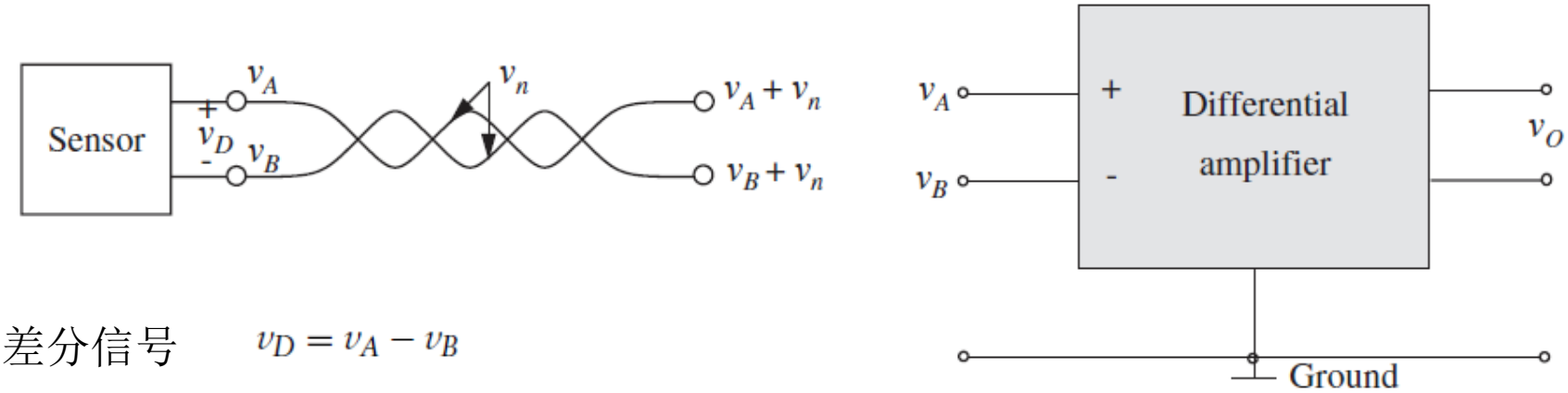


正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

MOSFET放大器的小信号分析

◆ 例8.3 差动放大器小信号分析



差分信号 $v_D = v_A - v_B$

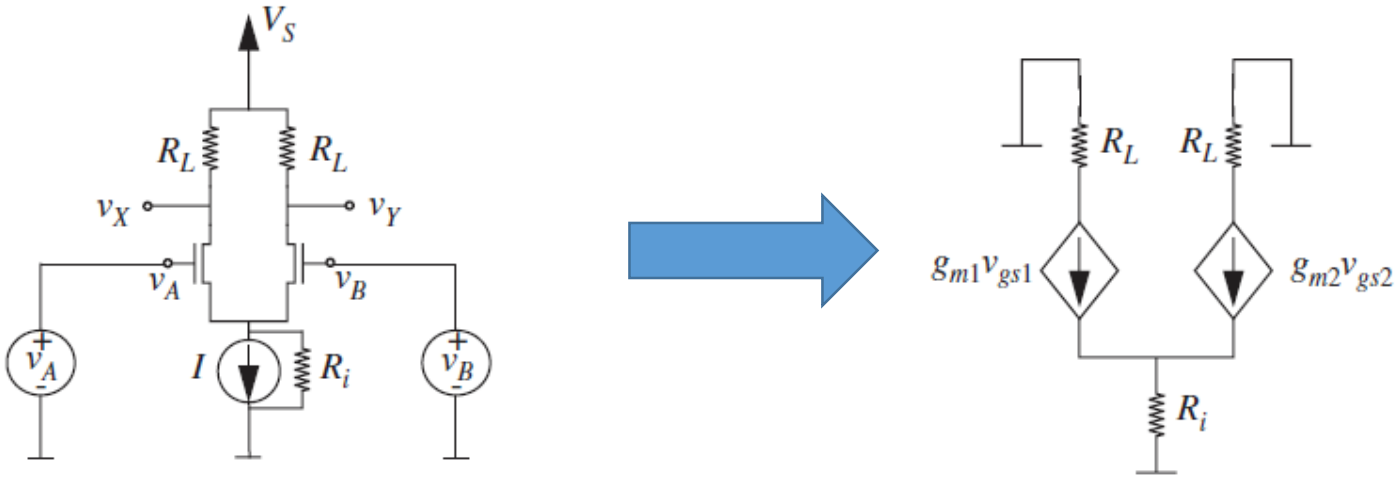
共模信号 $v_C = \dfrac{v_A + v_B}{2}.$

$$v_O = A_D v_D + A_C v_C$$

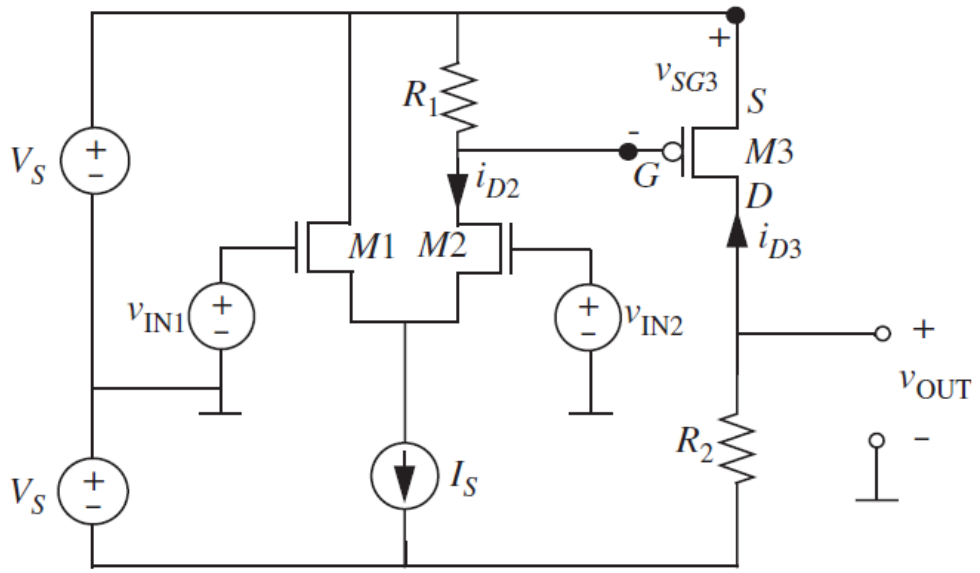
$$\text{CMRR} = \frac{A_D}{A_C}.$$

MOSFET放大器的小信号分析

◆ MOSFET实现差分放大器



讨论例题---例8.10（P293）

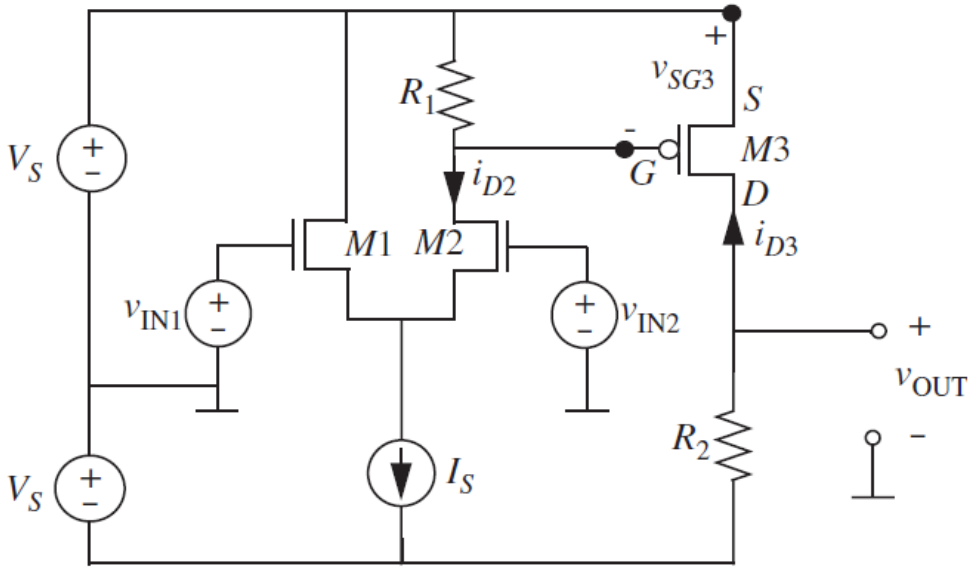


给出该电路小信号模型（晶体管M1,M2偏置电压相同）。

主观题 10分

设置

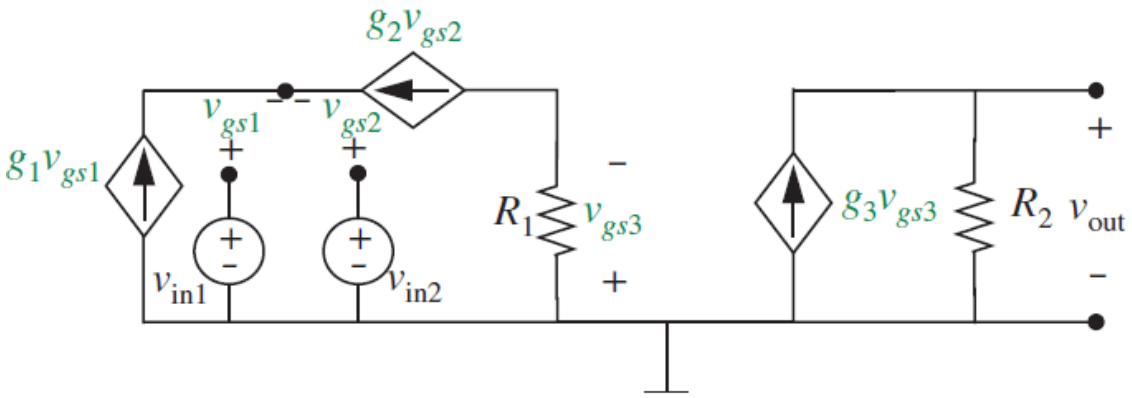
给出下图小信号输出-输入电压关系。



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

讨论例题---例8.10（P293）



$$v_{\text{out}} = \frac{R_1 R_2 \sqrt{2K_n K_p I(-I_{D3})}}{2}(v_{\text{in2}} - v_{\text{in1}})$$

主观题 10分

设置

总结大信号分析与小信号分析的关系？

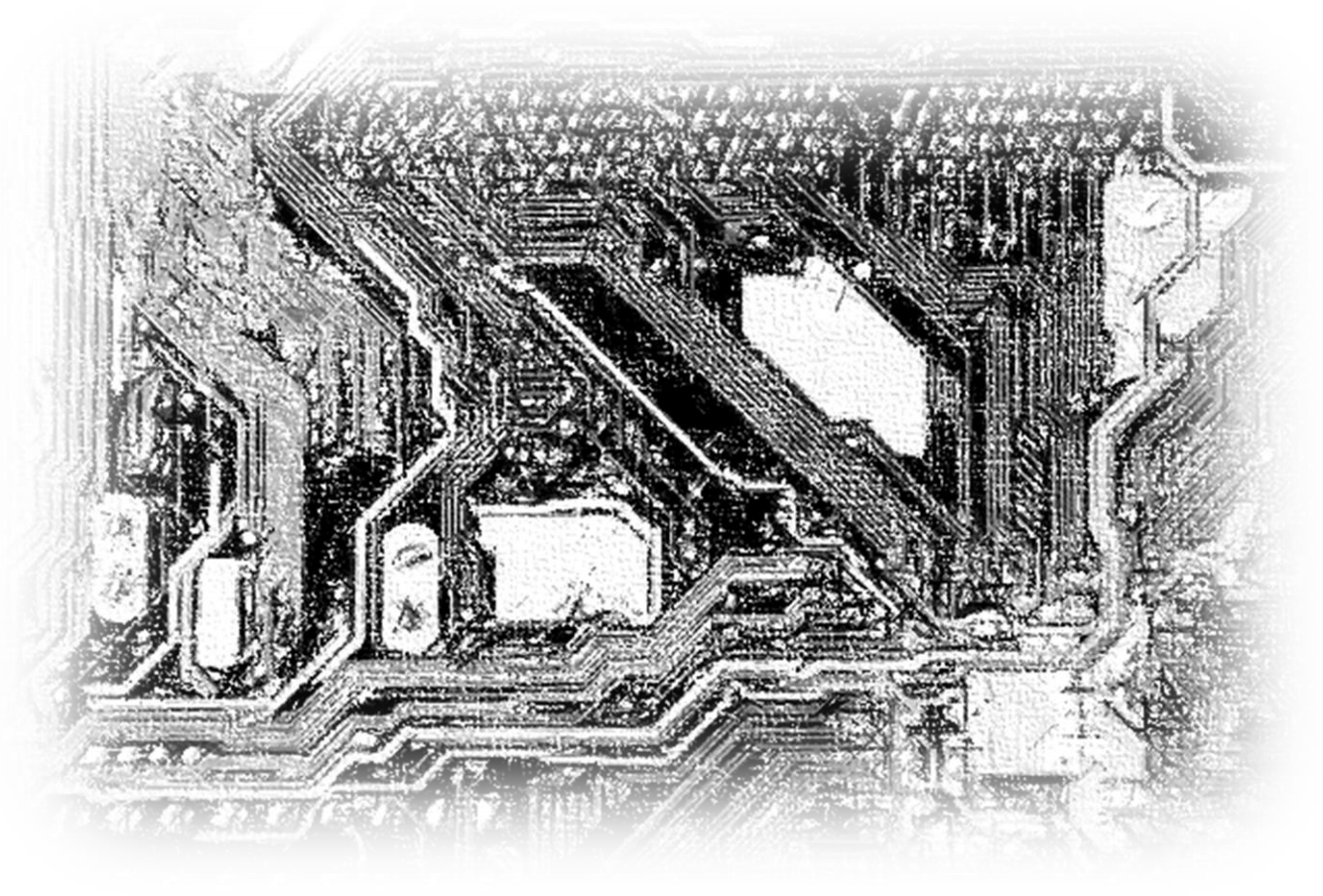
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

总结大信号分析与小信号分析的关系？

本章习题

- 练习8.4，8.6 （P295)
- 问题8.2，8.4 , 8.7, 8.10（P297)



何松柏
电子工程学院

谢谢！

UESTC

sbhe@uestc.edu.cn

Analog Circuits