《电路原理》期中参考讲义

江玮陶 jiangwt23@mails.tsinghua.edu.cn

2025 年 3 月 31 日

目录

1 单端口网络及其分析

1.1 线性性

电路中所说的线性性主要指**增量线性性**。也即，若一个线性电路对于输入$e_1(t)\,,e_2(t)$，产生输出$r_1(t)\,,r_2(t)$；则其对于输入$\alpha e_1(t)\,+\,\beta e_2(t)$，不一定产生输出$\alpha r_1(t)\,+\,\beta r_2(t)$。但假设输入增加$\Delta e(t)$，对应输出增加$\Delta r(t)$，则若输入增加$\alpha\Delta e(t)$，则输出增加$\alpha\Delta r(t)$。即线性电路的增量响应是线性的。这是因为，“线性电路”是可以含有独立源的；直接叠加会导致独立源的作用叠加，即常见的

$$y = kx + b$$

中的那个b.

1.2 戴维南-诺顿等效

基于戴维南-诺顿等效简化电路是本课程的重要能力。戴维南诺顿等效就是说，一个线性单端口网络可以等效为具有相同开路电压、短路电流的戴维南源和诺顿源，如图1所示。

图 1: 戴维南-诺顿等效电路

2 完备方程列写方法

2.1 结点电压法

本质：KCL方程
一般方法：

1. 使用诺顿定理把所有电压源变成电流源
2. 取一个结点接地，设出n-1个结点电压
3. 计算每个节点的自导g_i（连在上面的电导之和）和节点之间的互导g_{ij}（直接连接两个节点的电导之和）
4. 列出矩阵方程
5. 将自变量（激励）全都挪到左边，然后求解方程

方程的形式为：

$$\mathbf{Gv} = \mathbf{I}$$

其中：

$$[\mathbf{G}]_{ij} = \begin{cases} g_i, i = j \\ -g_{ij}, i \neq j \end{cases}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \cdots & v_{n-1} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & \cdots & I_{n-1} \end{bmatrix}^T$$

$$I_k = \sum_{node'_k s \quad neighbors} I_{source}, \quad {}_{i \to k}$$

2.2 回路电流法

本质：KVL方程

一般方法：

1. 使用戴维南定理把所有电流源变成电压源
2. 找电路的一棵最小生成树，利用电路上剩余的边与该树构成独立回路，共有$b - n + 1$ 个独立回路
3. 计算每个回路的自阻r_i(回路内所有电阻之和)与每两个回路的互阻r_{ij}(两回路公共边电阻之和，同向取正，反向取负)
4. 列写方程，化简求解

方程的形式为：

$$\mathbf{Ri} = \mathbf{V}$$

其中：

$$[\mathbf{R}]_{ij} = \begin{cases} r_i, i = j \\ r_{ij}, i \neq j \end{cases}$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 & i_2 & \cdots & i_{b-n+1} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \cdots & V_{b-n+1} \end{bmatrix}^T$$

$$V_k = \sum_{loop_k} V_{source}$$

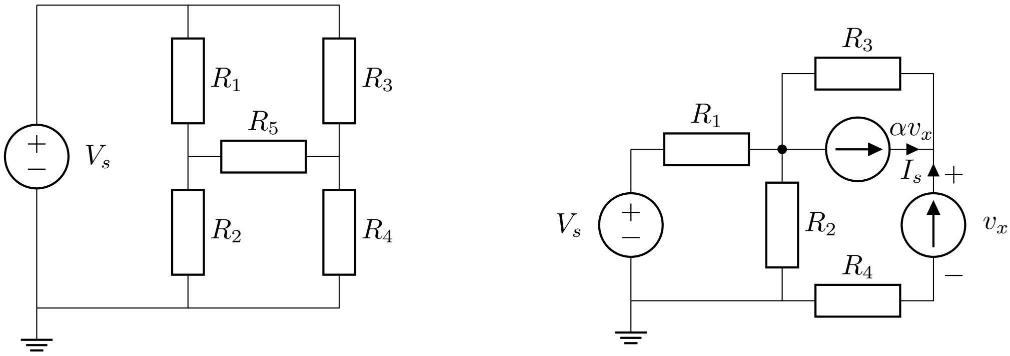
2.3 例题

2.3.1 节点电压法

列出如图2所示的电路的节点电压方程。

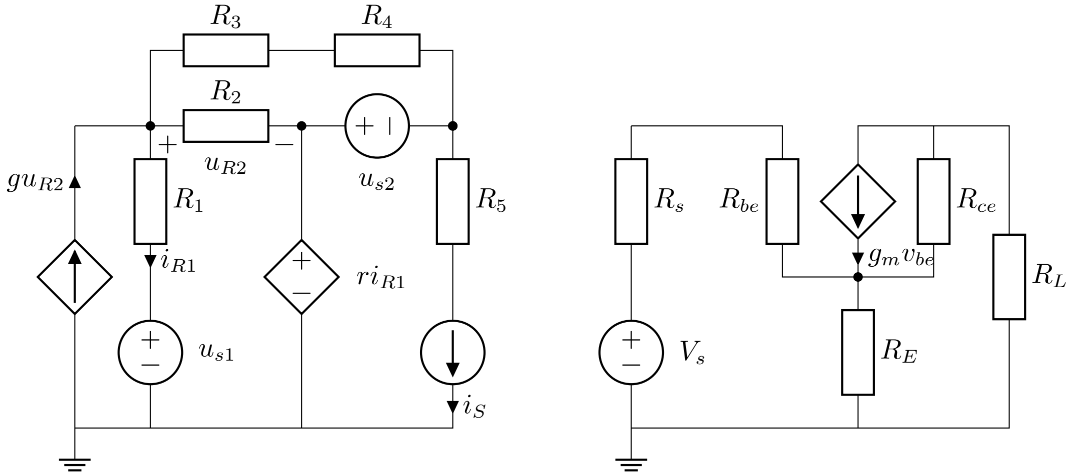
2.3.2 回路电流法

列出如图3所示的电路的回路电流方程。



(a) (b)

图 2: 节点电压法例题



(a) (b)

图 3: 回路电流法例题

3 二端口网络及其分析

3.1 网络参量矩阵

对四种矩阵的定义要牢记于心。注意T参量电流的符号（为什么？）以及各个参量的意义。

$$
\begin{aligned}
\text{R-parameter:}\quad V_1 &= R_{11}I_1 + R_{12}I_2\\
V_2 &= R_{21}I_1 + R_{22}I_2\\
\text{G-parameter:}\quad I_1 &= G_{11}V_1 + G_{12}V_2\\
I_2 &= G_{21}V_1 + G_{22}V_2\\
\text{H-parameter:}\quad V_1 &= H_{11}I_1 + H_{12}V_2\\
I_2 &= H_{21}I_1 + H_{22}V_2\\
\text{T-parameter:}\quad V_1 &= T_{11}V_2 - T_{12}I_2\\
I_1 &= T_{21}V_2 - T_{22}I_2
\end{aligned}
$$

3.2 网络的组合

牢记口诀：串串相连R相加，并并相连G相加；串并相连H相加，并串相连H^{-1}相加；级联T相乘。

例题 求图4所示网络的G参量矩阵。

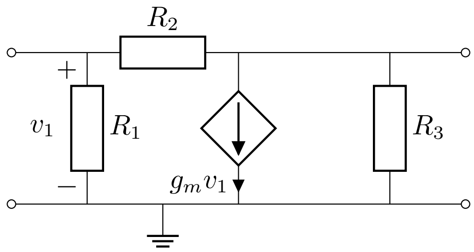


图 4: 某个二端口网络

3.3 应用

3.3.1 常见二端口网络的参量矩阵

一些常见的二端口网络T参量如图5所示。这两个网络应该背下来，因为可以用来快速求解梯形网络

串臂电阻 并臂电阻

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R} & 1 \end{bmatrix}$$

图 5: 常用网络的T参量

的T参量。同时，也要背一下前三种网络参量对应的等效电路，方便一眼看出结果。等效电路图如图6所示。

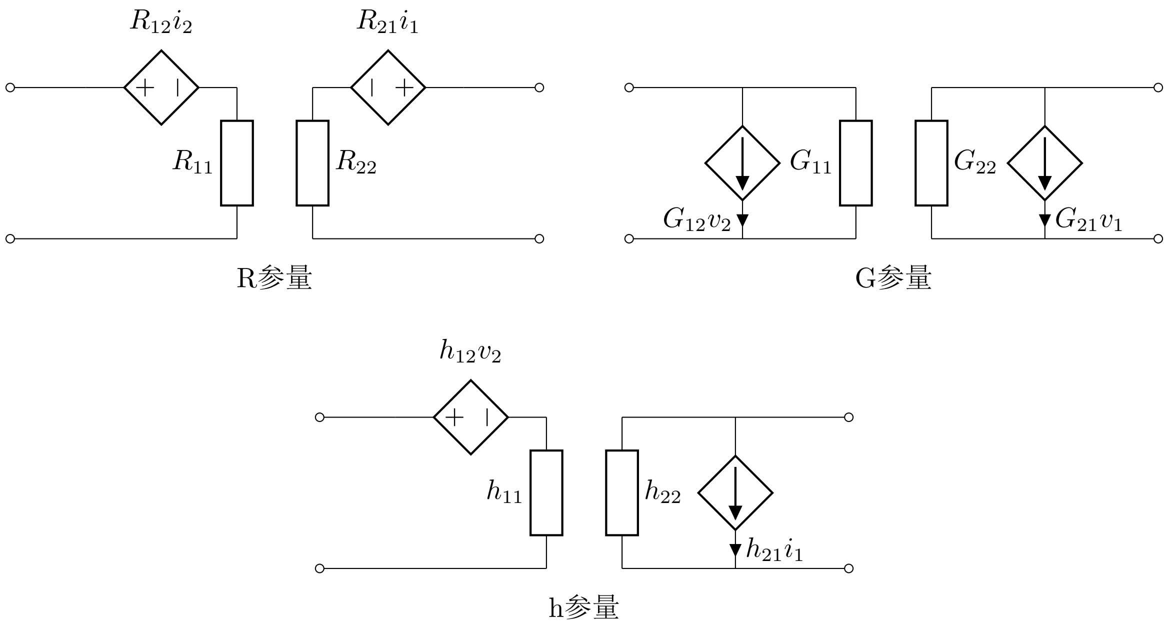


图 6: 网络参量等效电路图

3.3.2 $\Delta - Y$变换

$\Delta - Y$变换是一个重要的技巧，尤其在求解三角形电路时。$\Delta - Y$变换的公式如下：

$$
\begin{aligned}
R_{Y1} &= \frac{R_{\Delta 1}R_{\Delta 2}}{R_{\Delta 1}+R_{\Delta 2}+R_{\Delta 3}} \\
R_{Y2} &= \frac{R_{\Delta 1}R_{\Delta 3}}{R_{\Delta 1}+R_{\Delta 2}+R_{\Delta 3}} \\
R_{Y3} &= \frac{R_{\Delta 2}R_{\Delta 3}}{R_{\Delta 1}+R_{\Delta 2}+R_{\Delta 3}} \\
R_{\Delta 1} &= \frac{R_{Y1}R_{Y2}+R_{Y2}R_{Y3}+R_{Y3}R_{Y1}}{R_{Y2}} \\
R_{\Delta 2} &= \frac{R_{Y1}R_{Y2}+R_{Y2}R_{Y3}+R_{Y3}R_{Y1}}{R_{Y3}} \\
R_{\Delta 3} &= \frac{R_{Y1}R_{Y2}+R_{Y2}R_{Y3}+R_{Y3}R_{Y1}}{R_{Y1}}
\end{aligned}
$$

其实$\Delta - Y$变换可以利用网络参量来理解。我们构造这样两个二端口网络，如图7所示。 然后，计算两

图 7: $\Delta - Y$变换

个网络的R和G矩阵并相乘另其为I_2,即可得出一样的结论!

3.3.3 R_{in} , R_{out}与传递函数的快速计算

这个公式最好记下来，可以直接套用。

下面的S、L需要根据量纲进行替换：

$$X_{in} = x_{11} - \frac{x_{12}x_{21}}{x_{22}+L}$$
$$X_{out} = x_{22} - \frac{x_{12}x_{21}}{x_{11}+S}$$

对于单向网络，则有$x_{12} = 0$, 因此

$$X_{in} = x_{11}$$

$$X_{out} = x_{22}$$

4 元件与器件

4.1 运算放大器

运算放大器是常见的线性网络，其电路符号和等效电路图如图8所示。理论计算中，认为理想运算具有无穷大输入电阻，无穷大增益和0输出电阻特性。从而，其具有图9所示的电压传递曲线。当运算放大器的外围电路使之工作在线性区时，可以使用虚短特性分析电路。即，认为输入正负端口“又短又断”(电流电压都为0)。计算后，需要验证输出电压没有超过饱和电压$\pm V_{SAT}$ 。如果超过，则输出将饱和，体现为斩波等现象。

分析是否负反馈连接的方法：找到输入-输出-反馈-输入的一个闭合环路，假设给输入一个小扰动，看由于这个环路影响这个扰动会变小还是变大。

共模抑制系数 理想上，我们希望放大器差模而不放大共模。但由于生产工艺误差等，使用的元件往往与标称值有一定差异。用

$$CMRR := \left|\frac{A_{vd}}{A_{vc}}\right|$$

衡量差分放大器的性能，理想差分放大器的$CMRR$ 为正无穷。

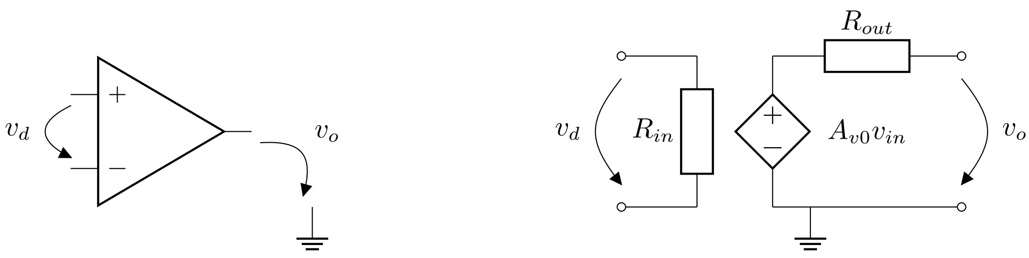


图 8: 运算放大器及其等效电路图

4.1.1 反馈判断方法

假设电路中某个点发生一个小的扰动，观察环路下来这个扰动是增大还是减小。假如增大，则是正反馈；假如减小，则是负反馈。

例题 分析图11所示电路的功能。

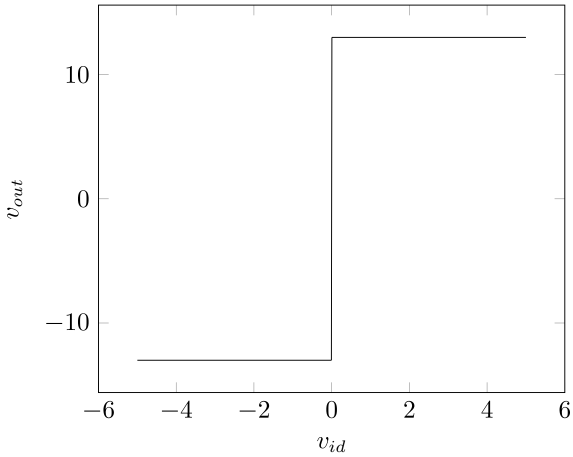


图 9: 理想运算放大器的电压传递曲线

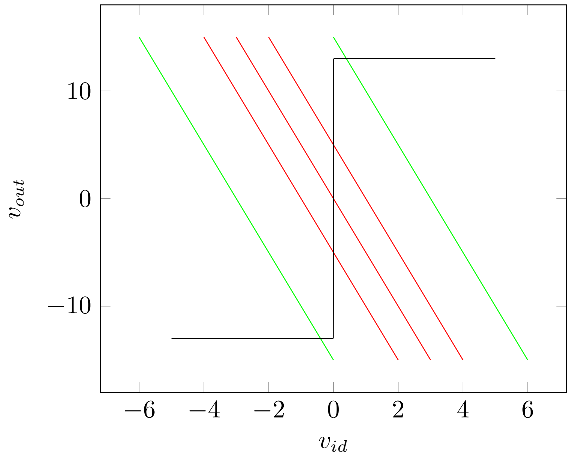


图 10: 负反馈状态下的运算放大器具有唯一解

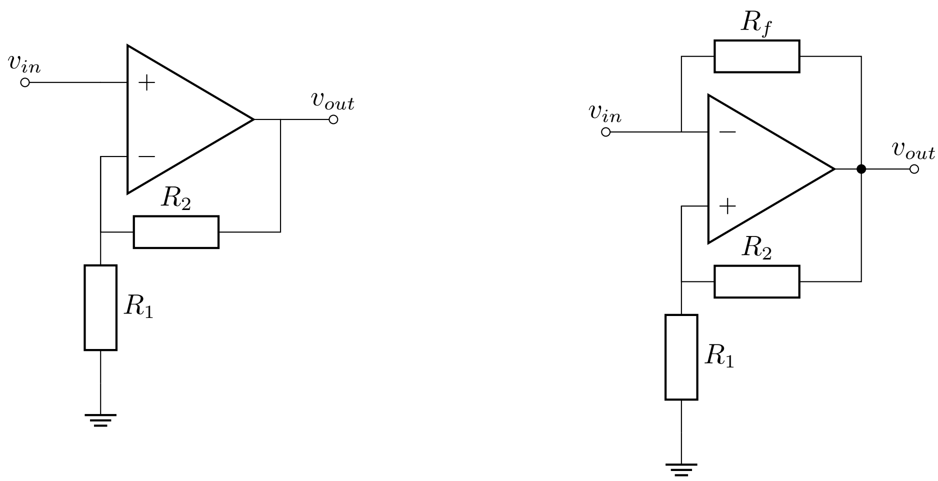


图 11: 运算放大器的反馈电路

4.2 二极管

二极管的元件约束方程为

$$i_D = I_{S0}(e^{\frac{v_D}{v_T}} - 1)$$

其中， $I_{S0} \approx 10fA = 1 \times 10^{-14}A$, $v_T \approx 26mV$. 其伏安特性曲线如图12所示。

在实际分析中，根据需求可以进行线性化近似。对于幅度不太大的情形，可以假设二极管具有“正偏0.7V反向恒压源，反偏开路”特性；对于幅度较大的情形（如一些整流器）可以进一步假设二极管导通压降为0。对于幅度非常小（在0.5V上下），则需要使用指数率控制关系进行分析。

含二极管电路的分析方法 首先假设二极管全都反偏，进而按照开路处理，再分析其余电路的行为；若二极管正偏，则说明假设有误，需要重新假设二极管正偏，再进行分析。(”扣掉“法)

稳压二极管 稳压二极管的符号如图13所示。认为稳压二极管具有正偏指数率、反偏截止、反向击穿时V_z 恒压源特性。

4.2.1 线性分离法

可以假想从二极管看出去，将剩余的电路等效为一个（时变）戴维南源，进而简化求解。

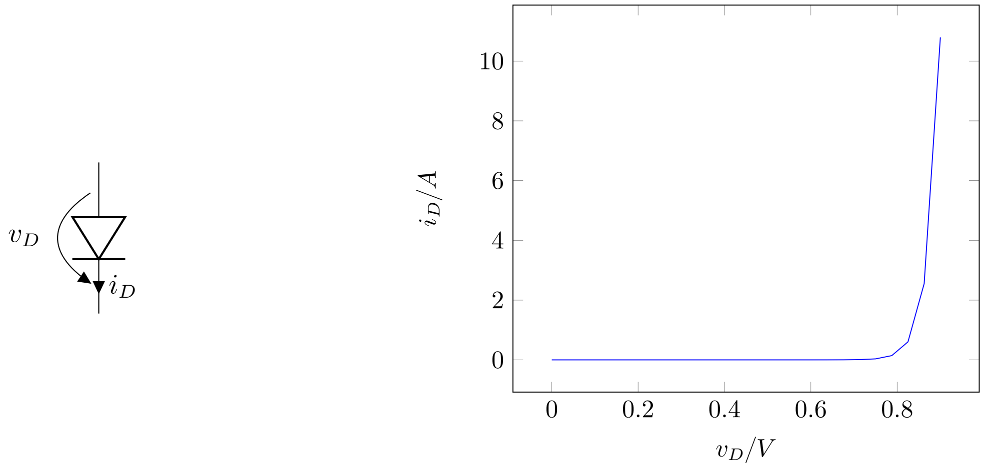


图 12: 二极管的伏安特性曲线

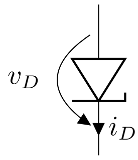


图 13: 稳压二极管

4.2.2 小信号法

本质上是叠加原理，分开考虑直流偏置和小信号的作用然后叠加。直流工作点计算后对各个元件“定性”，即替换为对应工作点的交流小信号模型；然后用线性电路的人系方法分析交流小信号的作用通常来说，交流小信号分析的步骤如下：

1. 直流分析。扼流圈视作短路，大电容视作开路，交流信源置0，解非线性方程(敲Casio(x))确定工作点$Q(V,I)$;
2. 套公式计算晶体管线性化参数(g_m 等)
3. 用受控源模型替代晶体管，作交流信号分析(直流源全部置0，大电容视作短路，扼流圈视作开路)求解代求物理量.

4.3 MOSFET

MOS场效应晶体管时具有二次控制关系的非线性受控电阻，分为NMOS和PMOS两种，如图14所示。

NMOS箭头朝外，PMOS箭头朝内，因为negative的东西要扔出去，positive的东西要拿进来。谁有箭头谁就是源（Source），控制电压是箭头两端的电压。

工作区判断 MOS场效应晶体管具有截止区、欧姆区、恒流区三个工作区。判断电路中MOS管工作区的方法如下：

1. 判断是否导通。若$v_{GS} > V_{THn}$ (对于PMOS则是$v_{SG} > V_{THp}$) 则MOS管导通；否则截止。截止区直接认为DS开路。

图 14: MOS场效应管

2. 对于导通的情形，计算出源漏饱和电压$V_{DS,sat} = v_{GS} - V_{THn}$ (对于PMOS则是$V_{SD,sat} = v_{SG} - V_{THp}$).

3. 若$v_{DS} > V_{DS,sat}$(PMOS$v_{SD} > V_{SD,sat}$) 则饱和，从而工作在恒流区；否则工作在欧姆区。

各个工作区数学形式 MOS场效应管不同工作区具有不同的受控特性。为了写出伏安关系，首先要计算工艺参量

$$\beta_n = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L}$$

$$\beta_p = \frac{1}{2}\mu_p C_{ox}\frac{W}{L}$$

和过驱动电压

$$v_{od} = v_{GS} - V_{THn} \quad (NMOS)$$

$$v_{od} = v_{SG} - V_{THp} \quad (PMOS)$$

则

$$i_D(v_{DS}) = \begin{cases} 0, v_{GS} < V_{TH} \\ 2\beta(v_{od}v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2), v_{DS} < V_{DS,sat} \\ \beta v_{od}^2(1 + \frac{v_{DS}}{V_E}), v_{DS} > V_{DS,sat} \end{cases}$$

注意各种$\frac{1}{2}$!!!!!!!!!

4.3.1 MOSFET的数字电路用法：CMOS电路设计方法

记住口诀：高边PMOS，低边NMOS；P管输入取非，N管输出取非；开关串联与逻辑，开关并联或逻辑。一般来说先画NMOS电路，然后画PMOS电路即可。

例题 画出实现以下逻辑函数的电路图

$$F(A, B, C) = (A + \bar{B}) \cdot C$$

4.3.2 MOSFET的模拟电路用法

（不知道这部分考不考）MOS可以作为受控电流源使用。其小信号模型如图15所示。

MOSFET

$$g_{ds} = \frac{I_{D0}}{V_E}$$

$$g_m = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\beta V_{od}$$

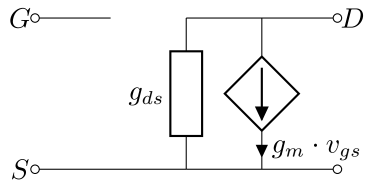


图 15: MOSFET的小信号模型（通用跨导器模型）