

# Project: 晶体管级电路仿真器

## 提交时间

- 5月8日（周一）：提交DC分析的网表、源码、文档
- 5月22日（周一）：提交瞬态分析的网表、源码、文档
- 6月5日（周一）：最终程序及文档提交（如需要修改）（可能会安排 presentation）

## 1. 项目要求

实现一个电路仿真工具，可以对包含 MOSFET、电阻器、电容器和电感器的电路执行 DC分析和瞬态分析。

为了提高非线性DC分析的收敛性，可参考第4部分的内容；为了保证瞬态仿真的准确性和提高效率，可参考第5部分的内容，动态调整时间步长。

## 2. MOS管模型

使用简单的MOSFET模型（即SPICE Level = 1的MOS模型的简化版，模型方程如下：

NMOS model:

Cut-off:  $V_{gs} \leq V_T$ ,

$$I_{ds} = 0$$

Linear:  $V_{gs} > V_T$  and  $V_{ds} \leq V_{gs} - V_T$ ,

$$I_{ds} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} ((V_{gs} - V_T)V_{ds} - \frac{1}{2}V_{ds}^2)$$

Saturation:  $V_{gs} > V_T$  and  $V_{ds} > V_{gs} - V_T$ ,

$$I_{ds} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

### PMOS model:

Cut-off:  $V_{sg} \leq -V_T$ ,

$$I_{sd} = 0$$

Linear:  $V_{sg} > -V_T$  and  $V_{sd} \leq V_{sg} - (-V_T)$ ,

$$I_{sd} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} ((V_{sg} - (-V_T))V_{sd} - \frac{1}{2}V_{sd}^2)$$

Saturation:  $V_{sg} > -V_T$  and  $V_{sd} > V_{sg} - (-V_T)$ ,

$$I_{sd} = \frac{1}{2} \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{sg} - (-V_T))^2 (1 + \lambda V_{sd})$$

**提示：MOSFET的源端和漏端不是固定的，需要由两个端口当前的电压值来判断。**

### 寄生电容模型：

简化起见，我们忽略MOS管模型中寄生电容的非线性特性，假定各寄生电容形式如下：

Gate-source capacitance:

$$C_{gs} = \frac{1}{2} C_{ox} WL$$

Gate-drain capacitance:

$$C_{gd} = \frac{1}{2} C_{ox} WL$$

Source/drain to ground junction capacitance:

$$C_d = C_s = C_{j0}$$

在网表中，MOSFET用以下语句调用（大小写不敏感）：

Mxxx <ND> <NG> <NS> <MODEL\_ID> <WIDTH> <LENGTH>

在网表文件中，MOS管的模型用以下.MODEL开头的语句定义（大小写不敏感）：

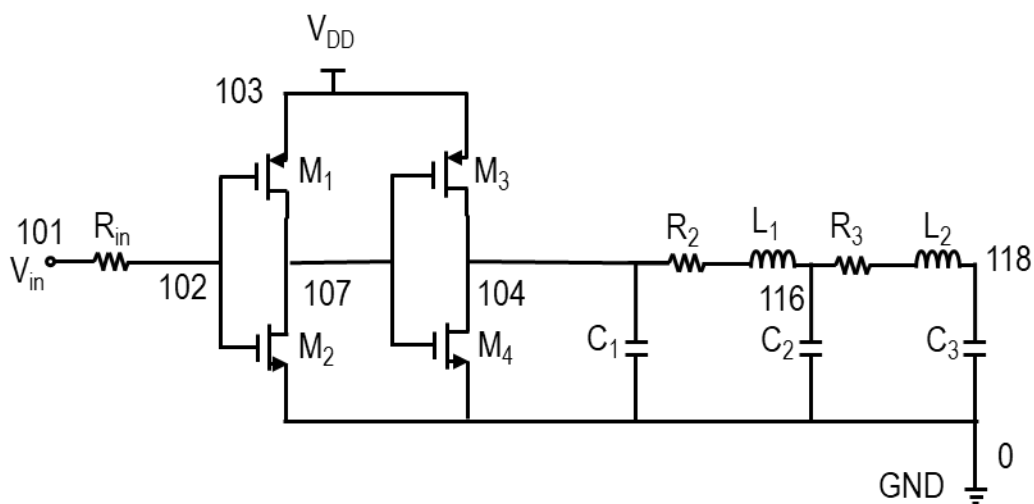
.MODEL <MODEL\_ID> VT <V<sub>T</sub>> MU <μ> COX <C<sub>ox</sub>> LAMBDA <λ> CJO <C<sub>j0</sub>>

其中 $V_T$ 是阈值电压的值， $\mu$ 是迁移率的值， $\lambda$ 是沟道宽度调制系数的值， $C_{J0}$ 是结电容的值。上述语句表示若采用类型为&ltMODEL\_ID>的晶体管，则定义阈值电压  $V_T = V_T$ ，迁移率  $MU = \mu$ ， $COX = C_{OX}$ ，沟道宽度调制系数  $LAMBDA = \lambda$ ，结电容  $CJ0 = C_{J0}$ 。晶体管的类型由&ltMODEL\_ID>的第一个字母决定，P开头表示晶体管模型为PMOS（大小写不敏感），N开头表示晶体管模型为NMOS（大小写不敏感）。其他网表格式可参考SPICE手册。

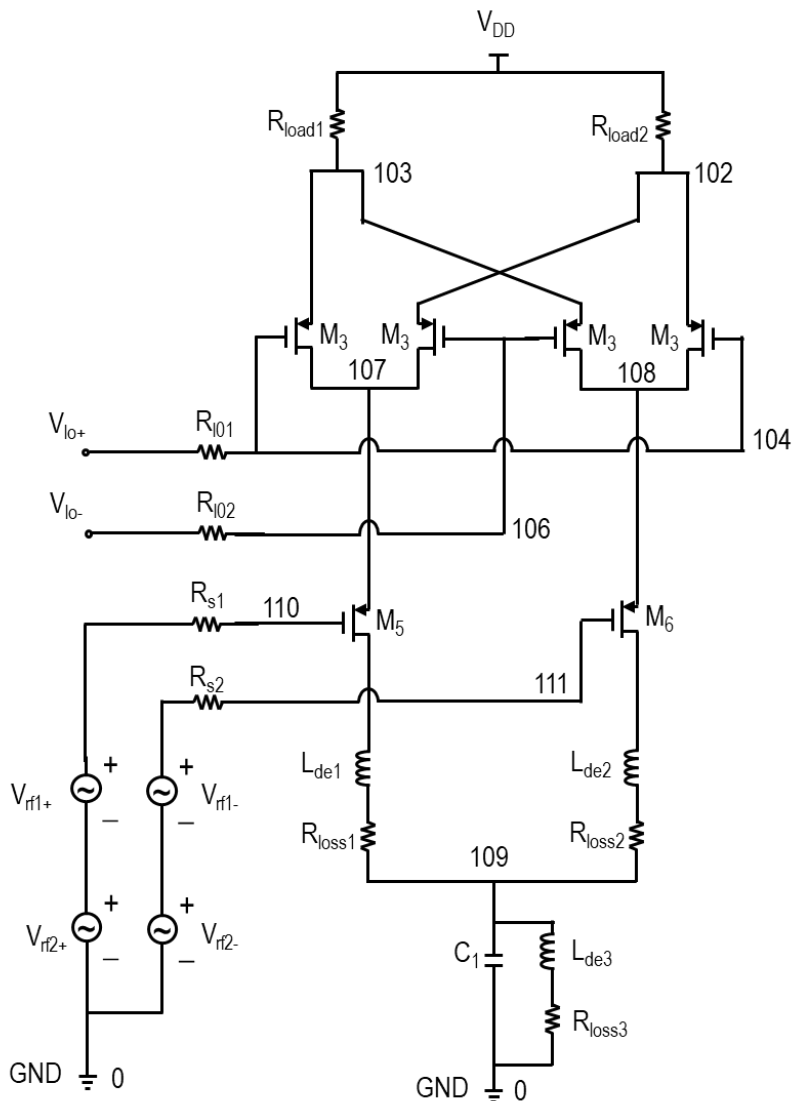
### 3.测试电路

我们有两个测试电路来验证仿真器的功能，如下所示：

#### 1. non-inverting buffer (buffer.sp)



#### 2. double balanced mixer (dbmixer.sp)



除此之外：

- (1) 必须自行设计一个简单的inverter，同样可以采用程序完成DC和瞬态分析。
- (2) 可以额外增加选取其他电路进行仿真。我们会根据你选取的电路的性能（如规模、仿真成本等）给予加分。

#### 4. 瞬态仿真的初值设定

在对非线性电路进行瞬态仿真之前，我们一般需要在  $t = 0$  的时候先进行DC仿真。但是，DC仿真需要一个较好的初始点，不合理的初始值设置很容易导致DC仿真失败。这里

列出了三种常见的解决方法。按实用性排列，越往后的方案越实用，因此建议尝试第三个方案。也欢迎同学们查找相关文献，寻求收敛性更好、成本更低的方案。我们会根据具体实现的创新性和实用性进行加分。但是不论采用何种方法，必须保证仿真结果的正确性。例如inverter基准电路的仿真结果都应该是上升沿输入，下降沿输出（或者反过来）。

1. 手工进行直流分析，将L和C的初始电流和电压设置为人工分析得到的直流解，直接做瞬态分析。注意：采用这一方案， $t = 0$ 处的解不是通过程序进行DC分析得到，而是手工分析得到的。
2. 将L和C的初始电流和电压设置为一个较为合理的猜测的值，然后进行直流分析，得到DC解，再用这一DC的解作为 $t = 0$ 时刻的瞬态解。相对前一方案，本方案所需的人工成本较少。
3. 将直流分析的电源视为具有较长上升时间的斜坡输入信号，将所有节点电压初始化为零，然后进行一次瞬态分析。使用本次瞬态分析结束时刻（即 $t = t_{\text{stop}}$ 处）的解作为实际瞬态分析 $t = 0$ 时刻的解，开始进行真正的瞬态分析。这种方法是对“打开”电源（即power on）这一过程的模拟，适用于大多数电路。注意：本方案需要进行一次额外的瞬态分析，得到 $t = 0$ 时刻的解。

## 5. 时间步长的动态调整

在瞬态仿真中，固定时间步长在某些情况下可能会导致较大的局部截断误差，还有可能会导致非线性牛顿迭代算法出现收敛问题。如果检测到不收敛，必须以较小的时间步长重新仿真电路，以实现收敛。因此，建议对时间步长进行动态调整。

为了估计时间步长，可能需要计算电容电压和电感电流的二阶导数（可以使用之前时间点的解来近似这些导数）。也欢迎同学们查找相关文献，开发自己的方法来动态控制时间步长。我们会根据具体实现的创新性和实用性进行加分。

为了评估动态时间步长调整方案的效率，建议对固定时间步长和动态时间步长的仿真结果进行比较。

## 6. 其他说明

1. 程序可以采用matlab、python、C/C++实现；
2. 不同的仿真所采用的网表有可能不同（主要体现在输入激励和输出的测试语句），参考HSPICE手册，基于给定的网表进行修改，以满足不同的仿真要求。

3. 建议在仿真结束后，绘制输出仿真波形（根据网表中的.probe语句指定所需画图的信号，一般是输出端的电压或者电流）。
4. 有兴趣可自行完成AC分析及稳态分析程序，本项目中提供的两个电路同样可以作为AC分析及稳态分析的测试电路。
5. 提交文件包括：
  - a) 测试网表及网表说明文档，包括对网表中特定语句的说明。建议尽量参考SPICE常规格格式，有修改或者不同之处一定要加以说明；
  - b) 源码，注意要进行仿真一定要根据网表建立方程。所以建立方程的源码和线性求解器的源码也需要提交；
  - c) 实验报告（pdf或者word格式），包括以下内容：
    - i. 程序说明文档（包括：输入输出及程序调用方法；类、函数等程序结构设计等）；
    - ii. 处理初值问题、时间步长控制等的具体实现方案；
    - iii. 自己构建的测试电路的电路图；
    - iv. 每个测试电路利用仿真程序得到的仿真波形及对仿真结果的分析（如第5部分中提到的固定时间步长和动态时间步长的仿真结果的比较等，以证明程序的正确性和效率），要求清晰可读性好。
    - v. 与仿真程序相关的其他创新性说明（要完成了具体的程序实现）
    - vi. 较为完整的文献及引用