

第 6 章 全真实器件的电路实现

6.1 三种模式电路搭建

以模式 1 的理想电路图（见图 3.22）为参考搭建真实电路，模式 1 电路信号源如图 6.1 所示，其中时钟 P31 为下极板采样时钟信号（开关断开时提前于 P1 控制的开关），其参数设置如图 6.2 所示，其余信号源参数设置于理想模式下的参数设置相同，不同的是添加了每个时钟的反相信号，它是通过图 6.1 中的 NOT 器件实现的，它是自己搭建并封装的一个反相器。

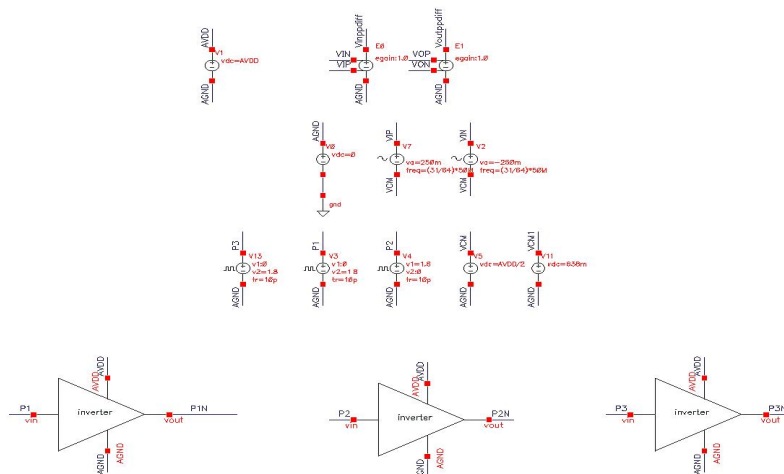


图 6.1 模式 1 电路测试信号源

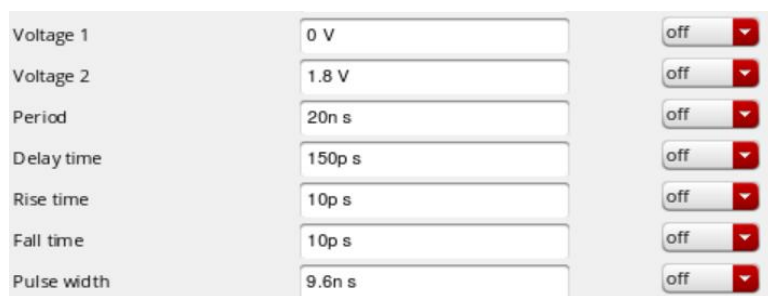


图 6.2 下极板采样控制时钟

模式 1 的电路图如图 6.3 所示，与理想模式下的电路图不同的是将其理想开关换成 MOS 开关，理想运放换成实际运放，而其电路接法也与理想模式下相同，唯一不同的是图 6.3 中圈出的 2 开关的控制信号变成了下极板采样控制信号 P3。在图 6.3 中圈出的开关均为栅压自举开关，其余开关都是普通的 CMOS 互补开关，运算放大器是第 5 章中搭建封装的运放。

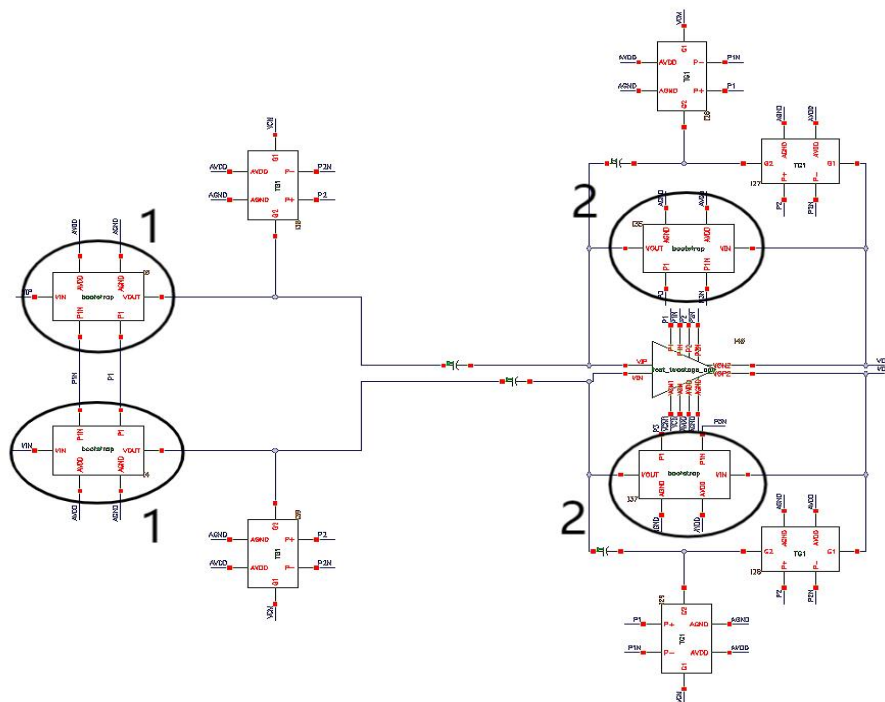


图 6.3 模式 1 电路图

模式 2 和模式 3 的实际电路与其理想模式下的电路基本相同, 不同之处参见模式 1 的实际电路更改处, 这两种模式的信号源的改变也基本和模式 1 相同。

6.2 工艺角仿真

芯片制造是一个复杂的物理和化学过程, 涉及掺杂浓度、扩散深度和刻蚀程度等工艺偏差。即使是同一晶圆切割出来的芯片, 其电性参数也会有所差异。因此, 工艺工程师以“工艺角”(Process Corner)的形式来划分各集成电路器件的工艺偏差范围。在设计芯片时, 芯片设计工程师必须确保芯片的性能指标在工艺角内仍然满足指标要求, 以维护芯片的良率。如图 6.4 所示, 工艺角的思想是: 把 NMOS 和 PMOS 晶体管的速度波动范围限制在由四个角所确定的矩形内。这四个角分别是快 NFET 和快 PFET, 慢 NFET 和慢 PFET, 快 NFET 和慢 PFET, 慢 NFET 和快 PFET。若采用 5-corner model 会有 TT、FF、SS、FS、SF 5 个 corners。如 TT 指 NFET-Typical corner & PFET-Typical corner。其中, Typical 指晶体管驱动电流是一个平均值, FAST 指驱动电流是其最大值, 而 SLOW 指驱动电流是其最小值(此电流为 I_{ds} 电流)。以上是从测量角度的解释。

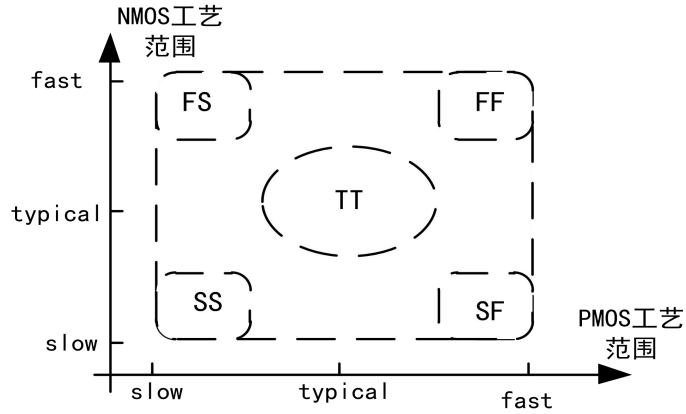


图 6.4 工艺角示意图

以模式 1 为例建立工艺角仿真：在搭建好的模式 1 电路原理图界面点击“Launch”→“ADE Explorer”，在下一个界面中选择“Create New View”，接着在下个界面中直接点击 ok 即可进入图 6.5 所示界面，在该界面中双击 1 处设置瞬态仿真，3u 的 conservative 精度的 tran 仿真；双击 2 处添加电路中设置的变量参数，双击后点击“Copy From”并为每个变量赋值，其中 CLN 和 CLP 分别为 CMOS 互补开关的 NMOS 和 PMOS 的沟道宽度， K 为栅压自举开关中的开关管的沟道宽度， WN 和 WP 分别为栅压自举开关中其他 NMOS 和 PMOS 管的沟道宽。

点击图 6.5 的第 4 处按钮进行一次仿真，接着添加输入输出波形图，点击“Tools”→“Calculator”，接着点击 vt 后在电路原理图中点击“Vinppdiff”，并将该波形添加到 ADE 界面，同样地添加 Voutppdiff 的波形。

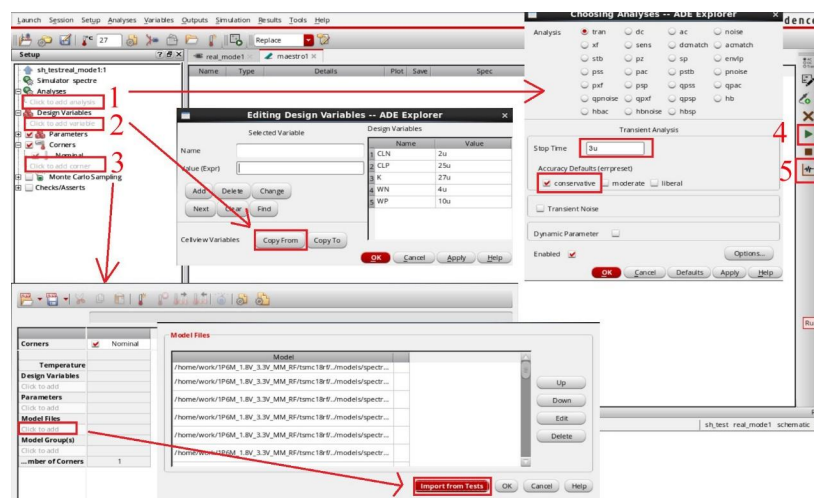


图 6.5 工艺角仿真设置

点击图 6.5 中的第 5 处按钮查看模式 1 的仿真波形并计算电路精度以及 THD 和有效位数。模式 1 的输入输出波形图如图 6.6 所示，在该界面选中输出信号的波形图，接着点击“Measurements”→“Spectrum”测量电路的 THD 和有效位数，按照如图 6.7 所示设置参数并点击“Plot”，在 Oouputs 中找到 ENOB 和 THD，右击鼠标选中该数据行，点击“ADE”→“Generic Expression”，将这两个数据发送的 ADE L 界面中。

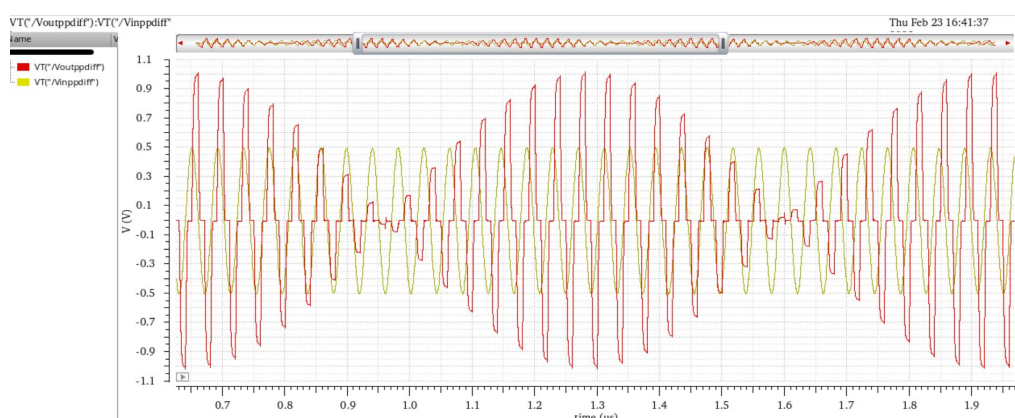


图 6.6 模式 1 输入输出波形图

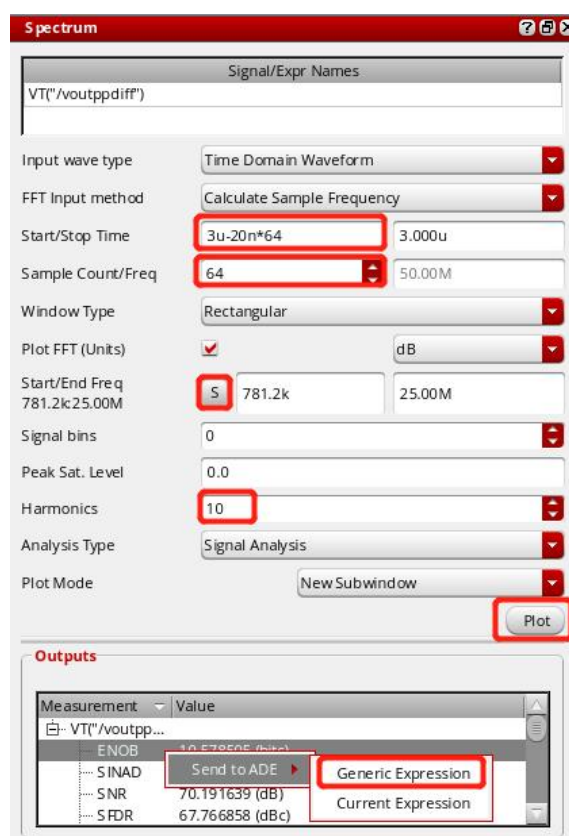
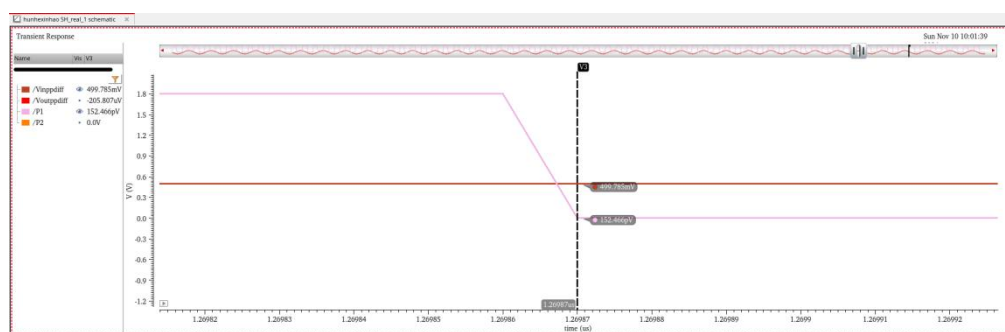
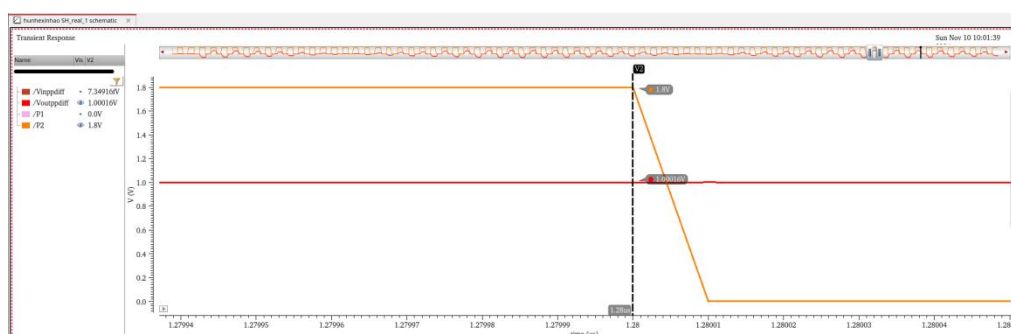


图 6.7 THD 及有效位数测量

测量并计算模式 1 的电路精度，方法如下：选择一个采样保持周期，查看 P1 时钟，取 P1 完全下降的时刻，如图 6.8 (a) 所示是 1.26987 us，查看 P2 时钟，取 P2 将要下降的时刻，如图 6.8 (b) 所示是 1.28us。确定好输入输出的选择时刻后，点击输出波形，打开 tools 中的 caculator，在 Function Panel 搜索并使用 value 函数，interpolate at 1.28 us，点击 OK，将该式存入栈中。同理，点击输入波形，打开 tools 中 Caculator，点击 value 函数，输入 1.26987us，点击 OK，将式子存入栈中。接下来开始带入精度公式计算，精度公式为： $-\log_2 \left(\frac{2 - \frac{V_2}{V_1}}{2} \right)$ ，其中 V2 是存入的 value(v("/Voutppdiff"?result"tran")1.28u)，V1 是存入的 value(v("/Vinppdiff"?result"tran")1.26987u)，在计算器中建立式子，绝对值函数和 log 函数可以在 Function Panel 中搜索使用，log 函数以 10 为底，所以要用到换底公式。最后构造出图 6.9 中所示函数，然后发送到 ADE 中进行仿真。



(a)



(b)

图 6.8 精度测量

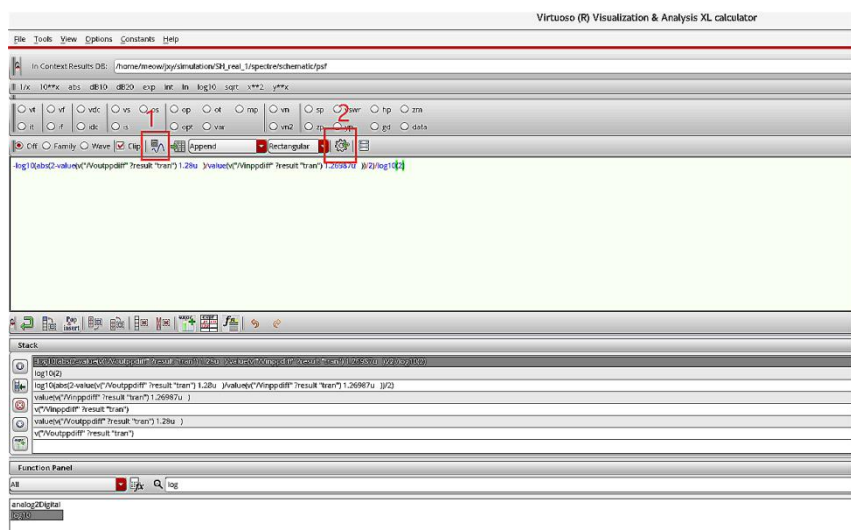


图 6.9 构造精度计算公式

为电路添加功耗仿真，功耗的计算公式是单周期内的平均电流乘以电源电压 AVDD，需要仿真电路电流波形，截取一段周期内电流求平均值，然后乘以 AVDD，得到功耗。具体步骤如下：打开 tools 中 Caculator，点击 it，然后在电路中点击 AVDD 节点，最后发送到 ADE 中，仿真得到电流波形。选择电流稳定后的一段周期，比如 640~660ns，在 Function Panel 中搜索使用 clip 函数，时间“from 640n to 660n”（根据自己仿真波形来定），点击右下角 OK。再搜索使用 average 函数，点击 OK。然后将结果乘以 AVDD 后取绝对值，功耗公式构建完成，如图 6.10 所示，发送到 ADE 当中，进行仿真。

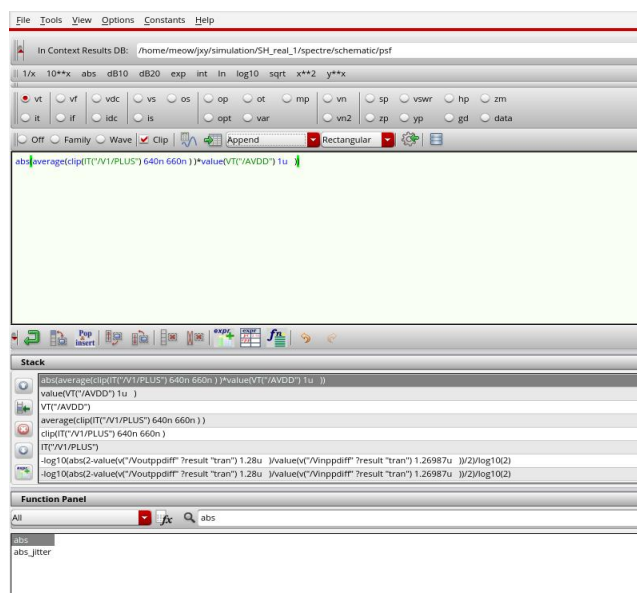


图 6.10 构造功耗公式

需要用到的仿真文件如图 6.11 所示，为在 tt 工艺角下进行的仿真，接下来对全工艺角进行仿真。

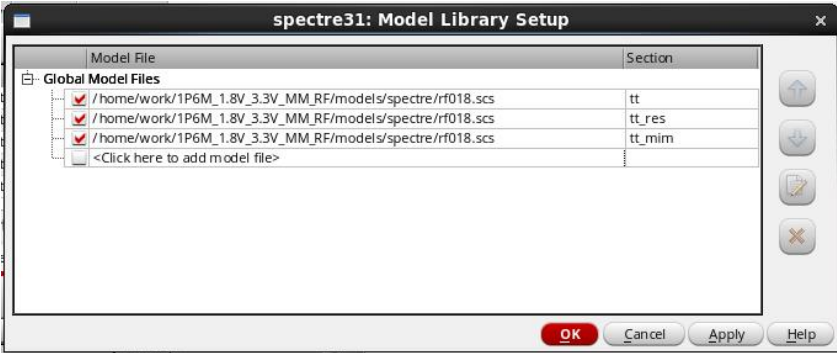


图 6.11 仿真文件配置

打开 ADE XL 仿真工具，在 Tests 中导入刚才保存的 ADE L 文件，如图 6.12 所示。还需将电路中的 AVDD 设置为变量。

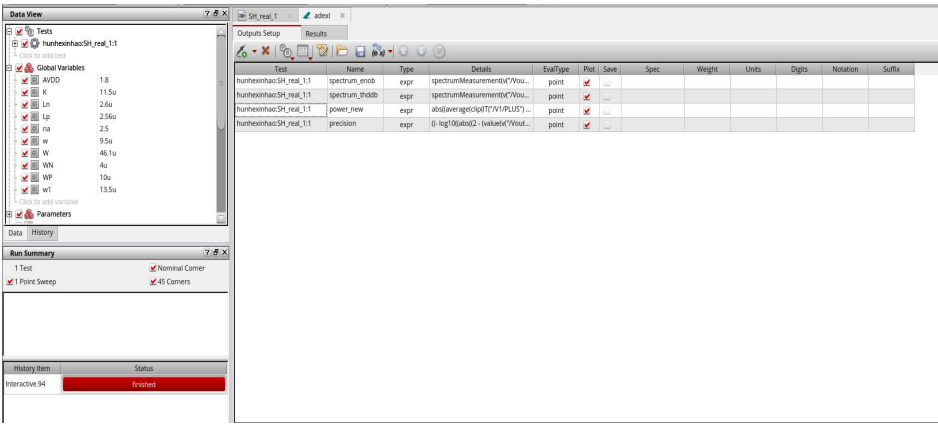


图 6.12 ADE XL 设置

下一步勾选 Corners，添加 new corner，再点击 add new corner，如图 6.13 所示。然后添加需要的仿真文件，如图 6.14 所示。然后再添加所需要的工艺角仿真，如图 6.15 所示。完整工艺角如图 6.16 所示，Temperature 中设置了 -40°，20°，80° 三个点，将 AVDD 设为变量，进行 1.8V ± 5% 的仿真，取了 AVDD 为 1.71 V，1.8 V，1.89 V 三个点，选取 ss，sf，tt，fs，ff 五种工艺角共计 3 × 3 × 5 = 45 种仿真结果。

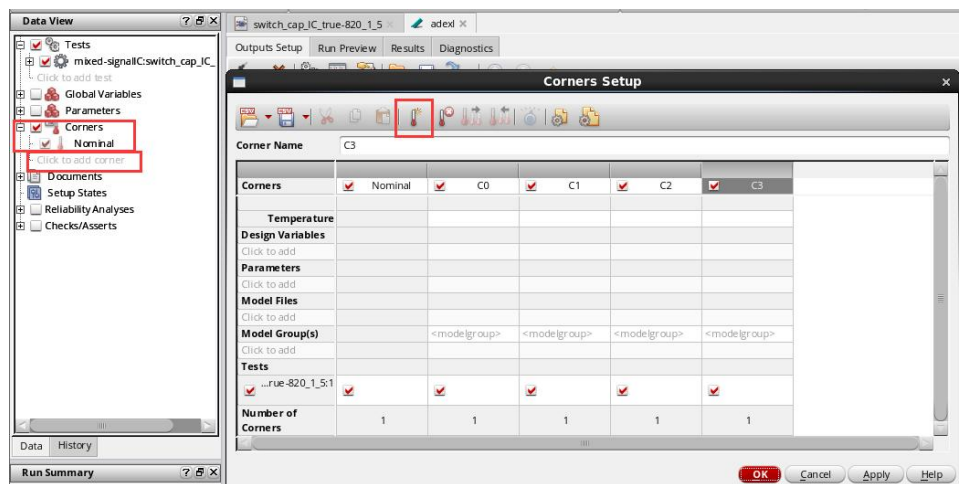


图 6.13 Corners 参数设置

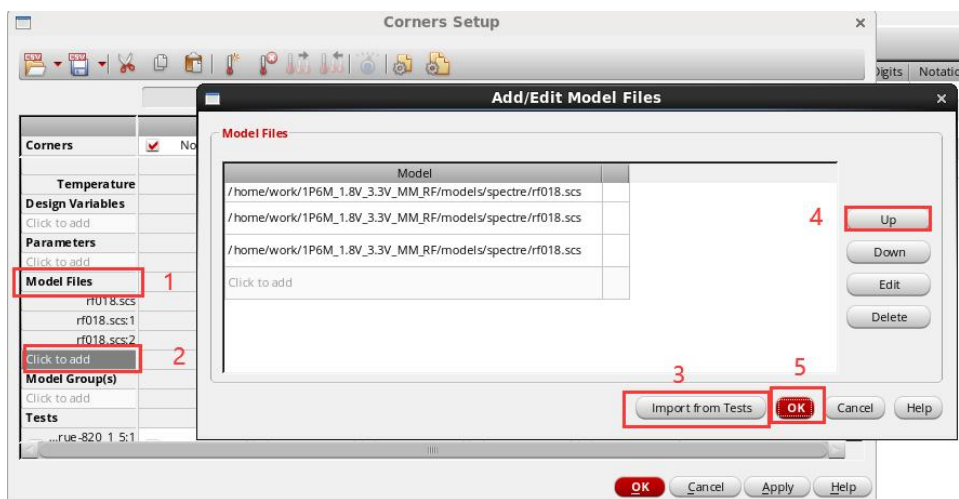


图 6.14 添加仿真文件

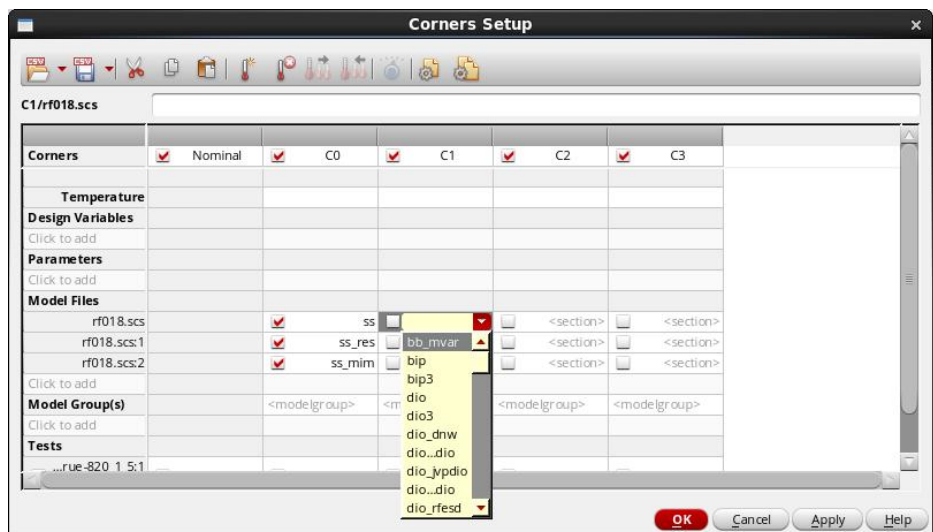


图 6.15 工艺角仿真



图 6.16 完整的工艺角仿真设置

完成所有设置后点击仿真即可进行工艺角仿真，模式 1 的工艺角仿真结果如图 6.17 所示，满足设计要求。

按照同样的方法可以进行模式 2 和模式 3 的工艺角仿真，分别如图 6.18 和 6.19 所示，同样满足设计要求。

	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	ss_9	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	ss_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim
	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res
	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	ss_9	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	9.282	10.6	12.08	10.16	11.68	12.4	10.6	11.79	12.72	13.72	13.48	13.85	13.9	14.36	13.64	14.55	13.69	13.98
	-57.68	-65.73	-76.35	-63.02	-72.95	-79.17	-65.73	-73.26	-81.48	-86.52	-84.29	-86.29	-87.98	-91.26	-86.45	-91.55	-88.46	-91.38
	8.832m	11.3m	13.16m	9.75m	12.39m	14.39m	10.66m	13.46m	15.6m	11.09m	13.77m	15.81m	12.14m	14.98m	17.16m	13.23m	16.23m	18.54m
	8.131	11.44	9.747	9.572	10.92	9.844	10.23	11.18	10.42	10.63	10.55	10.62	10.69	10.62	10.95	10.57	10.77	11.61
	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim	tt_mim
	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res
	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8
	12.59	13.17	13.8	13.02	13.81	14.04	13.3	13.84	14.04	12.51	13.13	13.56	13.01	13.51	13.37	13.42	13.83	13.57
	-78.42	-82.73	-86.24	-81.54	-87.53	-88.98	-84.16	-89.96	-90.35	-78.17	-82.13	-86.66	-81.92	-85.37	-83.97	-85.77	-89.11	-85.96
	16.35m	19.21m	21.25m	17.68m	20.72m	22.89m	19.06m	22.26m	24.55m	25.57m	28.1m	29.79m	27.66m	30.34m	32.17m	29.78m	32.62m	34.54m
	11.2	10.72	10.78	10.96	10.55	10.95	10.65	10.65	10.94	12.03	11.13	11.64	11.19	11.13	12.45	11.45	11.03	12.95
	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89									
	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim	ff_mim									
	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res									
	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff									
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80									
	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	15.22	15.4	14.31	15.36	15.5	14.22	15.69	15.87	14.26									
	-98.64	-96.62	-88.47	-97.2	-96.65	-87.6	-98.67	-98.68	-87.83									
	30.52m	33m	34.71m	33.03m	35.64m	37.45m	35.6m	38.33m	40.24m									
	14.17	12.85	10.2	15.51	13.16	10.02	14.56	14.14	9.797									

图 6.17 模式 1 工艺角仿真

ENOB THD Precision POWER	ss_0	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min
	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res
	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	ss_0	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	8.763	9.614	9.88	10.14	10.46	10.23	10.69	10.63	10.38	10.74	10.38	10.04	10.96	10.58	10.24	11.18	10.77	10.36
	-54.56	-59.68	-61.32	-62.87	-64.84	-63.38	-66.22	-65.84	-64.29	-66.43	-64.24	-62.23	-67.76	-65.49	-63.43	-69.11	-66.62	-64.18
	8.223	11.78	9.3	11.77	10.18	9.542	11.04	10.22	10.1	10.91	10.67	10.68	10.52	10.68	11.08	10.61	10.93	11.83
	8.857m	11.43m	13.27m	9.679m	12.36m	14.36m	10.08m	12.8m	14.86m	11.62m	14.47m	16.59m	12.1m	14.98m	17.18m	12.5m	15.41m	17.65m
ENOB THD Precision POWER	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	fs_0	fs_1	fs_2	fs_3	fs_4	fs_5	fs_6	fs_7	fs_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min
	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res
	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	fs_0	fs_1	fs_2	fs_3	fs_4	fs_5	fs_6	fs_7	fs_8
	11.6	11.23	10.89	11.91	11.41	11.1	12.07	11.64	11.26	12.14	12.15	11.75	12.52	12.27	11.99	12.87	12.55	12.13
	-71.73	-69.41	-67.36	-73.63	-70.53	-68.58	-74.6	-71.92	-69.56	-75.16	-75.26	-72.58	-77.7	-76.17	-74.14	-80.05	-77.67	-74.87
	11.2	10.86	10.91	10.62	10.72	10.91	10.58	10.77	11.14	12.2	11.34	12.53	11.66	11.55	12.78	11.51	11.2	13.71
	17.31m	20.35m	22.49m	17.78m	20.85m	23.05m	18.15m	21.23m	23.46m	27.23m	29.92m	31.68m	27.87m	30.61m	32.48m	28.35m	31.12m	33.02m
ENOB THD Precision POWER	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89									
	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min									
	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res									
	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff									
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80									
	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	12.74	12.25	11.85	13.02	12.44	12	13.22	12.62	12.13									
	-78.58	-75.52	-73.1	-80.2	-76.71	-74.02	-81.42	-77.75	-74.8									
	19.29	12.59	10.18	13.5	12.59	9.889	13.23	12.84	9.717									
	32.65m	35.31m	37.14m	33.3m	35.98m	37.87m	33.9m	36.6m	38.52m									

图 6.18 模式 2 工艺角仿真

ENOB THD Precision POWER	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	ss_9	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	ss_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min
	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	ss_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res
	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	ss	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf	sf
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	ss_1	ss_2	ss_3	ss_4	ss_5	ss_6	ss_7	ss_8	ss_9	sf_0	sf_1	sf_2	sf_3	sf_4	sf_5	sf_6	sf_7	sf_8
	9.838	10.14	9.882	10.28	10.42	10.04	10.74	10.6	10.2	10.75	10.41	10.05	10.9	10.53	10.18	11.03	10.66	10.33
	-61.06	-62.86	-61.28	-63.7	-64.52	-62.26	-66.57	-65.64	-63.23	-66.51	-64.42	-62.3	-67.38	-65.16	-63.06	-68.21	-65.98	-63.96
	9.48m	12.11m	14.09m	9.917m	12.59m	14.6m	10.31m	13m	15.06m	11.82m	14.69m	16.86m	12.29m	15.18m	17.39m	12.75m	15.66m	17.89m
	9.387	11.45	8.918	10.89	10.02	9.151	12.78	9.993	9.256	10.74	10.58	10.36	10.71	10.28	10.10	10.22	10.25	
ENOB THD Precision POWER	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	fs_0	fs_1	fs_2	fs_3	fs_4	fs_5	fs_6	fs_7	fs_8
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89
	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min	tt_min
	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	tt_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res	fs_res
	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	tt	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs	fs
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80
	tt_0	tt_1	tt_2	tt_3	tt_4	tt_5	tt_6	tt_7	tt_8	fs_0	fs_1	fs_2	fs_3	fs_4	fs_5	fs_6	fs_7	fs_8
	11.65	11.23	10.87	11.79	11.37	11.01	11.88	11.46	11.13	12.2	12.11	11.69	12.59	12.31	11.88	12.78	12.37	11.99
	-71.99	-69.4	-67.2	-72.87	-70.26	-68.04	-73.39	-70.82	-68.8	-75.58	-74.9	-72.2	-77.95	-76.07	-73.41	-79.48	-76.43	-74.07
	17.46m	20.52m	22.7m	17.96m	21.03m	23.23m	18.43m	21.51m	23.72m	27.3m	30.02m	31.87m	28.04m	30.79m	32.66m	28.77m	31.51m	33.39m
	11.27	10.99	10.81	11.27	10.56	10.75	10.97	10.61	10.63	14.32	13.55	13.25	14.54	13.41	15.17	13.28	12.94	15.87
ENOB THD Precision POWER	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	1.71	1.71	1.71	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89									
	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min	ff_min									
	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res	ff_res									
	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff	ff									
	-40	20	80	-40	20	80	-40	20	80									
	ff_0	ff_1	ff_2	ff_3	ff_4	ff_5	ff_6	ff_7	ff_8									
	12.53	12.16	11.78	12.76	12.33	11.91	12.92	12.51	12.08									
	-77.28	-75.03	-72.68	-78.72	-76.06	-73.46	-79.77	-77.11	-74.5									
	32.59m	35.28m	37.17m	33.5m	36.18m	38.07m	34.37m	37.04m	38.93m									
	12.81	12.31	10.21	12.95	12.53	10.14	13.34	13.02	10.04									

图 6.19 模式 3 工艺角仿真