

# 4

## ADS 在信号完整性分析中的应用

### 4.1 ADS 的基本使用

#### 4.1.1 ADS 主要操作窗口

##### 1. 主窗口

打开 ADS，将弹出 ADS 的主窗口，如图 4-1 所示。ADS 主窗口主要用来创建或打开工程，进行文件管理、工程管理等。它主要包含菜单栏、工具栏、文件浏览区和工程管理区等几个部分。

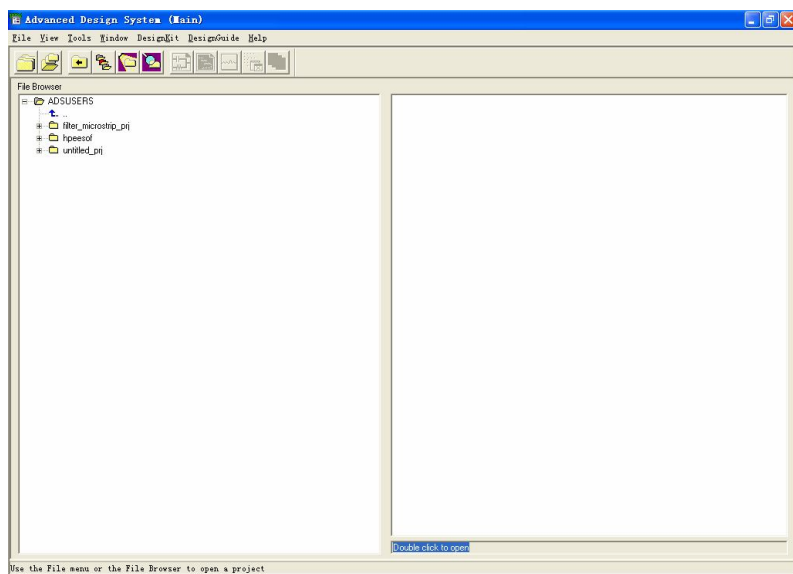


图 4-1 ADS 主窗口

##### 2. 原理图设计窗口

单击 File→Open Project 打开一个已存在的工程文件，或者创建一个新的工程文件，如图 4-2 所示。

将打开一个原理图设计窗口，如图 4-3 所示。原理图设计窗口包含标题栏、菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板、画图区等。在该窗口可以进行电路的设计和分析。



图 4-2 Open Project 对话框

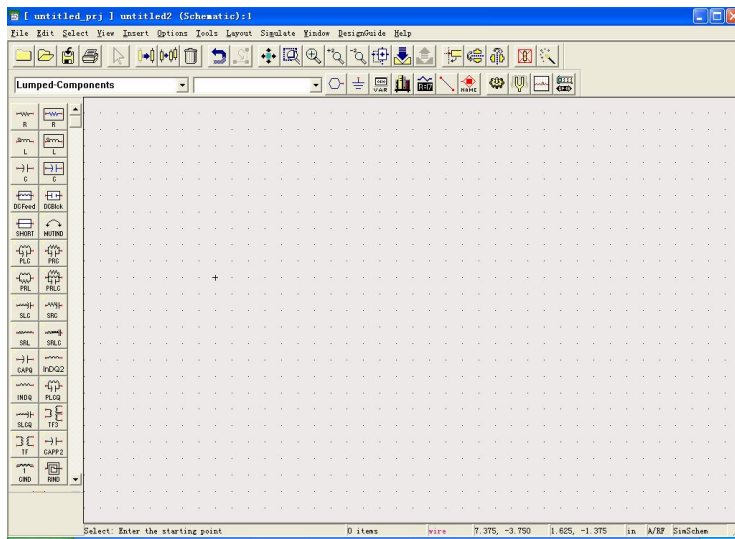


图 4-3 原理图设计窗口

### 3. 布局图设计窗口

布局图设计窗口用来进行布局图的设计、编辑和仿真，如图 4-4 所示。布局图设计窗口与原理图设计窗口的内容基本相同。

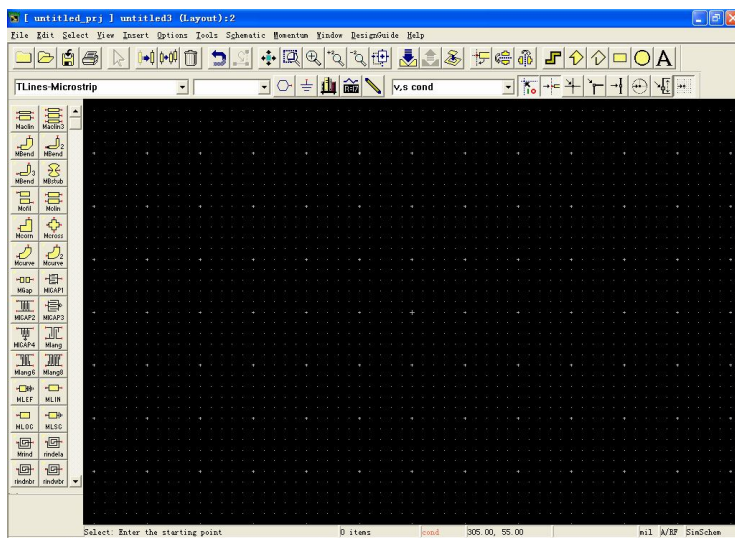


图 4-4 布局图设计窗口

#### 4. 数据显示窗口

数据显示窗口用来显示仿真的结果，也可以显示从其他数据源获取到的数据。数据显示窗口包括标题栏、菜单栏、工具栏、数据来源列表和数据显示方式面板等。如图 4-5 所示。

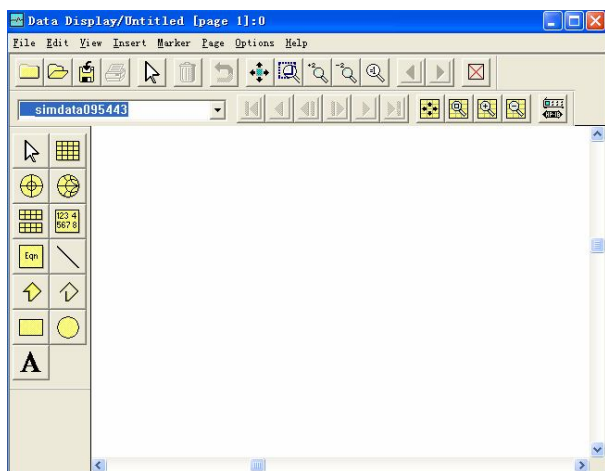


图 4-5 数据显示窗口

#### 4.1.2 ADS 基本操作

本节以一个简单的电路分析为例介绍 ADS 的基本操作步骤。

##### 1. 建立电路模型

(1) 添加三极管及其模型并设置参数

- 1) 在原理图设计窗口中选择 Devices-BJT 元件面板列表，选择元件 BJT\_NPN 放入原理图中。
- 2) 同样在 Devices-BJT 元件面板列表中选择 BJT\_Model 放入原理图中，如图 4-6 所示。

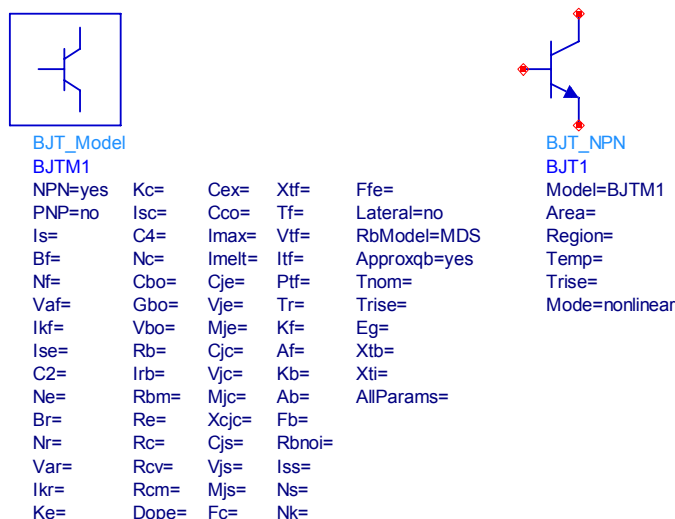


图 4-6 插入 BJT 模型

- 3) 双击 BJT\_Model 模型，出现参数设置对话框，单击 Component Options 按钮，在弹出窗口

中的 Parameters Visibility 栏中选择 Clear All，单击 OK 按钮，然后单击 Apply 按钮，可以看到原理图中的参数列表已经被清空。

4) 接着，在 BJT\_Model 参数设置对话框中对模型参数进行设置。选择参数 Bf，设置其值为 Beta，并选中复选框 Display parameter on schematic，单击 Apply，此时 Beta 已成为电路的一个参数，如图 4-7 所示。

5) 设置 Vaf（预置电压）=50，同样选中 Display parameter on schematic 复选框。

6) 设置 Ise（EB 两极漏电流）=0.19e-12，并选中 Display parameter on schematic，单击 OK 按钮，此时模型就有了一些实际参数，如图 4-8 所示。

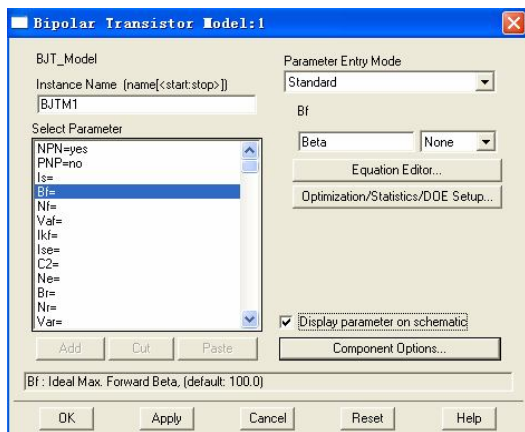


图 4-7 模型参数设置

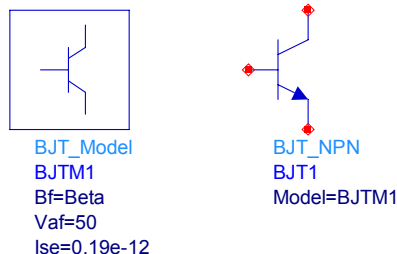


图 4-8 完成参数设置后的模型

7) 按照同样的方法去掉 BJT\_NPN 元件中的一些不希望显示的参数，如区域、面积、模式和温度等，如图 4-8 所示。

#### (2) 加入寄生元件并设置端口

本节加入代替三极管寄生参数的电感和电容元件，并加入相应的连接部分。

1) 在原理图设计窗口中的 Lumped-Components 列表中选择 3 个电感 L 和 2 个电容 C 插入到电路图中。

2) 设置电感值为 320pH，电容值为 120fF，这里要注意电感和电容的单位。并将其中一个电感的 R 参数设置为 0.01Ω。

3) 放置端口并命名。单击工具栏中的 Insert Port 按钮，在原理图中插入 3 个端口，并分别命名为 C、B 和 E。它们分别代表三极管的集电极（C）、基极（B）和发射极（E）。

4) 按照图 4-9 连接各个元件。

#### (3) 创建电路符号

下面将把图 4-9 中的电路建成一个符号。这里使用 ADS 内部的 BJT 符号，方法如下：

1) 在原理图窗口中选择 View→Create/Edit Schematic Symbol，出现 Symbol Generator 对话框，单击 OK 按钮，默认符号就会出现。

2) 默认符号出现后，在菜单栏中选择 Select→Select All，并单击 Delete 删除默认符号。

3) 在原理图窗口中选择 View→Create/Edit Schematic 命令，回到原理图设计窗口中。

4) 在原理图窗口中选择 File→Design Parameters，打开 Design Parameters 对话框。

5) 选择 Design Parameters 对话框中的 General 选项卡，对参数进行修改：

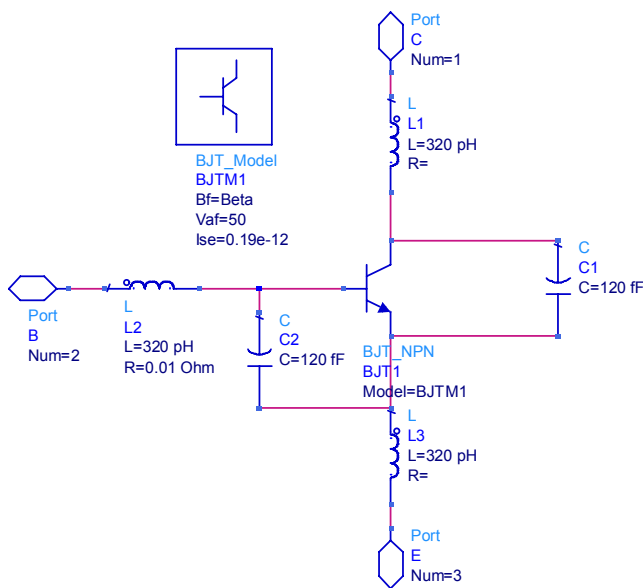


图 4-9 带有寄生元件和端口的原理图

①在 Component Instance Name 框中改变元件名为 Q。

②单击 Symbol Name 框旁边的下拉箭头，选择符号 SYM\_BJT\_NPN。

③在布线模型 Artwork 栏的 Type 和 Name 中分别选择 Fixed 和 SOT23，如图 4-10 所示。

6) 单击 Save AEL file 按钮，写入修改值。

7) 单击 Parameter 选项卡，在 Parameter Name 框中输入 Beta，在 Default Value 框中输入 100，单击 Add 按钮，将参数添加到模型中去。选中 Display parameter on schematic 框，单击 OK 按钮保存设置，并关闭对话框，如图 4-11 所示。

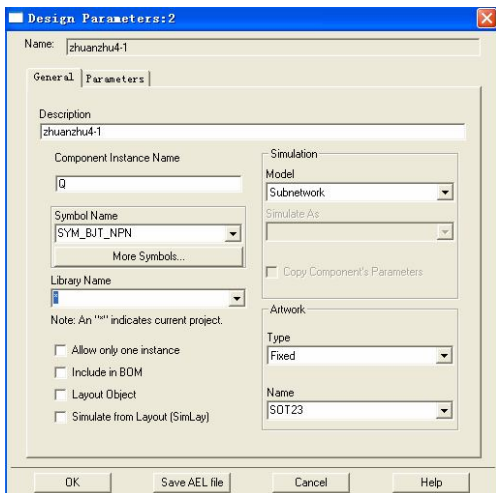


图 4-10 内建符号设置

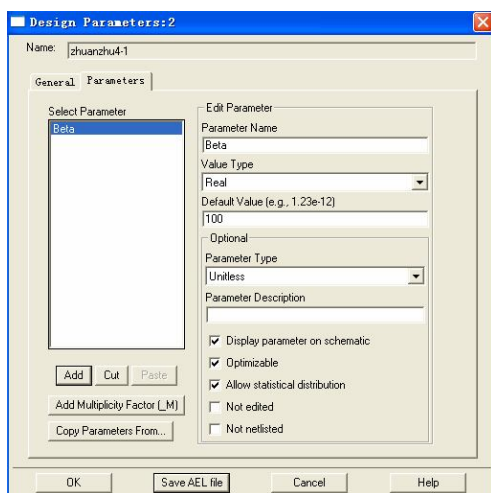



图 4-11 给符号添加参数

8) 单击 Save 按钮保存原理图，电路符号就创建完毕了。

(4) 插入电路符号

在原理图中添加这个新建的电路符号的过程如下：

- 1) 打开一个新的原理图设计窗口，并命名为 dc\_curves
- 2) 单击 Display Component Library List 按钮 ，弹出 Component Library/Schematic 窗口，如图 4-12 所示。

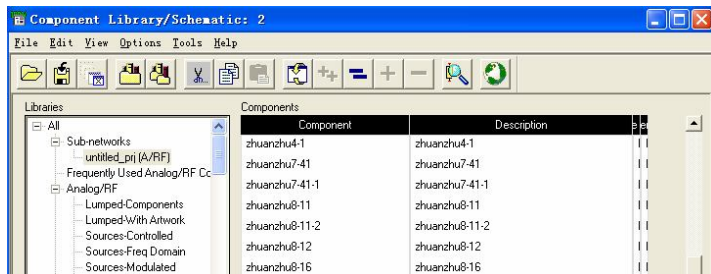


图 4-12 插入电路符号 zhuanzhu4-1

- 3) 在 Components 窗口中选择 zhuanzhu4-1，并单击 zhuanzhu4-1 子电路。
- 4) 移动光标到新的原理图设计窗口中，就可以在绘图区插入 zhuanzhu4-1 子电路了。

#### (5) 创建直流仿真电路原理图

电路符号创建完毕，就可以创建直流仿真电路原理图了。

- 1) 在 Sources-Freq Domain 列表中选择直流电压源 V\_DC，并插入到原理图中。双击 V\_DC，在弹出的参数设置对话框中将 Vdc 的值设置为 VCE，单击 OK 按钮确定。
- 2) 在 Sources-Freq Domain 列表中选择直流电流源 I\_DC，并插入到原理图中。双击 I\_DC，在弹出的参数设置对话框中将 Idc 的值设置为 IBB，单击 OK 按钮确定。
- 3) 在 Probe Components 列表中选择电流观察仪器 I\_Probe，将它放在合适的位置上。
- 4) 将所有插入的元素按照图 4-13 所示的方式连接起来。

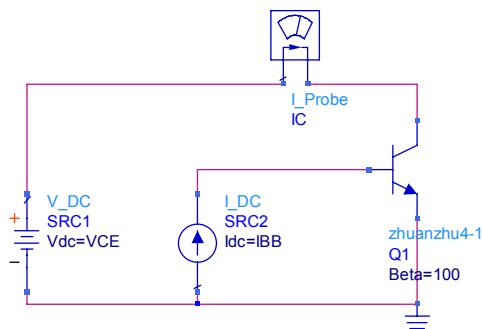


图 4-13 直流仿真原理电路图

- 5) 在 Simulation-DC 列表中选择直流仿真器 DC，并放置在原理图窗口中。双击直流仿真器，按照下面的内容进行修改：

- ①设置 Parameter to sweep 为 VCE。
  - ②设置 Sweep Type 为 Linear。
  - ③Start=0，表示扫描变量 VCE 的起始值为 0。
  - ④Stop=5，表示扫描变量 VCE 的终止值为 5。
  - ⑤Step-size=0.01，表示扫描变量 VCE 的扫描间隔为 0.01。
- 设置完成后，单击 OK 按钮完成设置，如图 4-14 所示。

6) 在 Simulation-DC 列表中选择 PrmSwp。

- ① 设置 Parameter to sweep 为 IBB，表示扫描参数为 IBB。
- ② 设置 Sweep Type 为 Linear，表示扫描类型为线性扫描。
- ③ Start=20uA，表示扫描变量 IBB 的起始值为 20uA（注意：用 uA 表示微安）。
- ④ Stop=100uA，表示扫描变量 IBB 的终止值为 100uA。
- ⑤ Step-size=10uA，表示扫描变量 IBB 的扫描间隔为 10uA。

然后，选择 Simulation 选项卡，在 Simulation1 中添入 DC1，表示扫描是针对 DC1 进行仿真的。单击 OK 按钮完成设置，如图 4-15 所示。

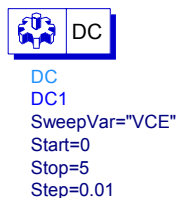


图 4-14 设置直流仿真器

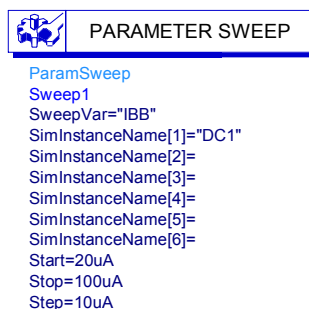


图 4-15 设置参数扫描控件

7) 在 Simulation-DC 列表中选择显示模板控件 Disp Temp，并放置在原理图设计窗口中。双击 Disp Temp，在弹出的 Automatic Data Display Template 窗口中设置仿真结果的显示模板。

- ① 单击 Browse installed templates 按钮。
- ② 在弹出的 Component Library/Template Browsers 窗口的左窗格中先选择 product 文件夹，在右窗格中选择 BJT\_curve\_tracer 元件。
- ③ 最后回到 Automatic Data Display Template 窗口中单击 Add 按钮添加模板，并单击 OK 按钮确定。

完成设置的显示模板控件如图 4-16 所示。

8) 单击工具栏中的 VAR 按钮，在原理图中插入一个变量控件，双击变量控件，按下面的内容进行参数设置：

- ① VCE=0V，表示 VCE 为变量，且默认值为 0V。
- ② IBB=0A，表示 IBB 为变量，且默认值为 0A。

设置完成后单击 OK 按钮确认，完成设置的变量控件如图 4-17 所示。



图 4-16 设置显示模板控件

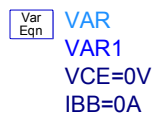


图 4-17 变量控件

## 2. 原理图仿真

(1) 在工具栏中单击 Simulate 按钮执行仿真，由于在原理图中加入了数据显示模板，因此仿真数据会与绘图结果一起生成。

(2) 在列表框中插入 IC.i 数据，注意 VCE 数据是缺省的 X 轴数据，不必插入，如图 4-18 所示。



(3) 观察数据窗口, 此时窗口出现了关于 IC 与 VCE 的数据曲线, 如图 4-19 所示。

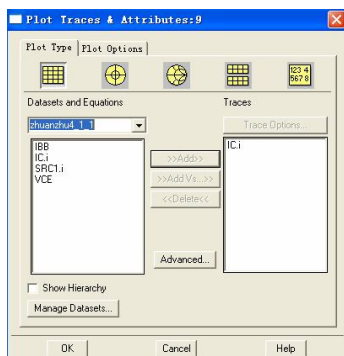


图 4-18 插入 IC.i 数据

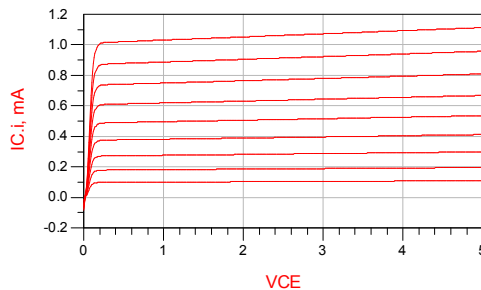


图 4-19 仿真结果

(4) 在原理图中改变  $\beta=140$ , 重新仿真, 新的 IC 与 VCE 的数据曲线如图 4-20 所示。

(5) 在曲线上插入一个新的 Marker, 可以看到不同点处的具体参数值, 如图 4-21 所示。

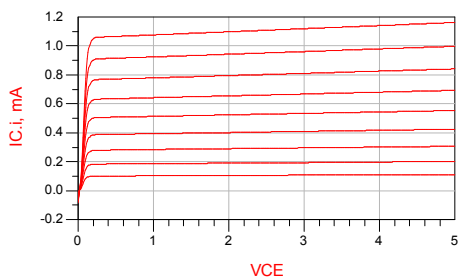


图 4-20 Beta=140 时的仿真结果

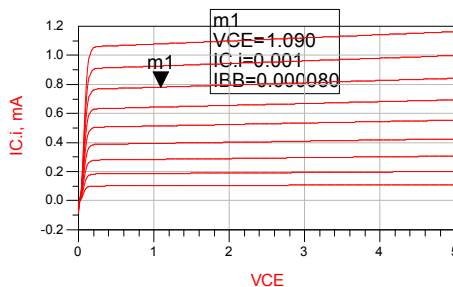



图 4-21 插入一个 Marker, 显示具体参数

(6) 插入 list 按钮 , 插入 IC.i 数据, 如果出现如图 4-22 所示的图形, 双击该图形, 单击 Plot Options 选项卡, 选中 Suppress Table Format 复选框 (见图 4-23), 就可以显示正确的数据, 如图 4-24 所示。

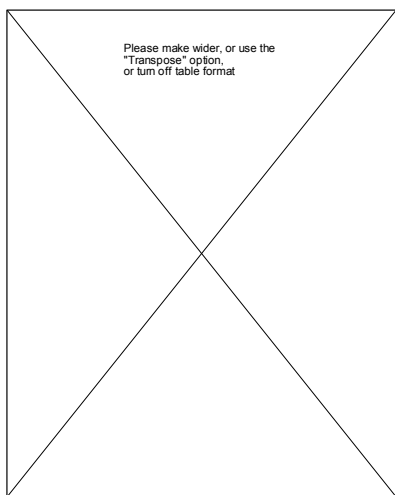


图 4-22 显示数据错误

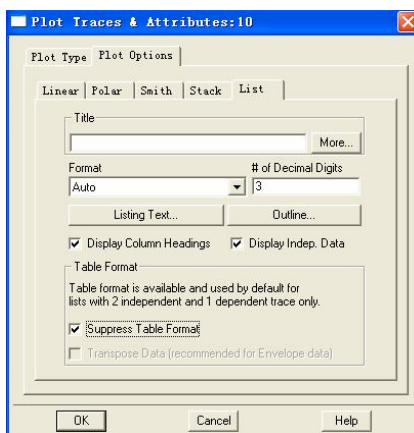


图 4-23 选择 Suppress Table Format



VCE	IC.i
BB=2.000E-5	
0.000	-14.62uA
0.010	-7.112uA
0.020	1.956uA
0.030	12.48uA
0.040	24.14uA
0.050	36.38uA
0.060	48.47uA
0.070	59.72uA
0.080	69.56uA
0.090	77.70uA
0.100	84.12uA
0.110	89.00uA
0.120	92.58uA
0.130	95.16uA
0.140	96.98uA
0.150	98.26uA
0.160	99.15uA
0.170	99.76uA
0.180	100.2uA
0.190	100.5uA
0.200	100.7uA
0.210	100.8uA
0.220	101.0uA
0.230	101.0uA
0.240	101.1uA
0.250	101.1uA
0.260	101.2uA
0.270	101.2uA
0.280	101.2uA
0.290	101.3uA

图 4-24 显示 IC.i 数据

## 4.2 元器件的等效电路模拟

### 4.2.1 示波器探针的等效电路模型

本节建立一个示波器探针的电路模型，各个元器件的参数如图 4-25 所示。

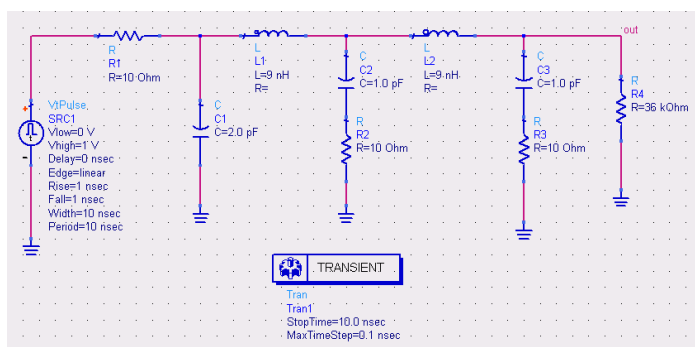


图 4-25 示波器探针的等效电路模型

仿真的电压测试点的波形如图 4-26 所示。

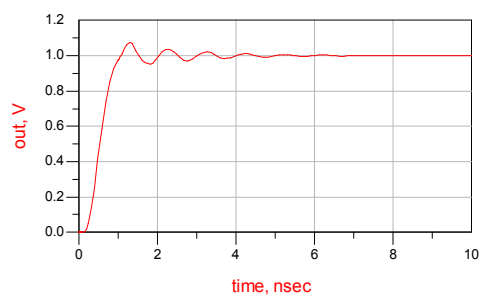


图 4-26 电压测试点的波形

如果电感减小为 0.2nH，如图 4-27 所示，那么仿真效果如图 4-28 所示。

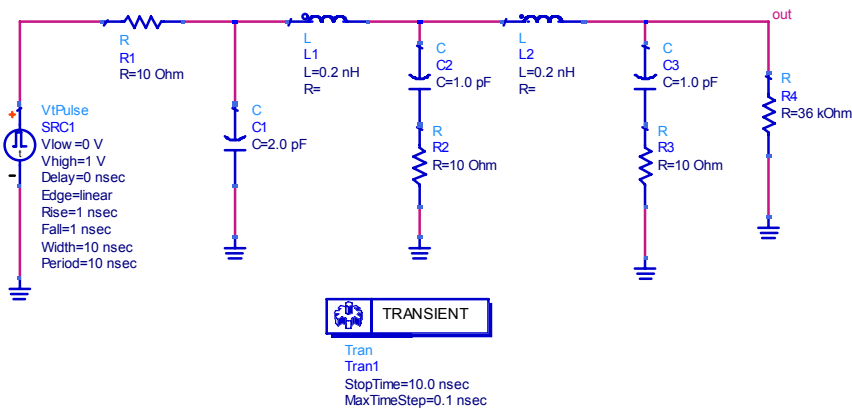


图 4-27 电感减小为 0.2nH

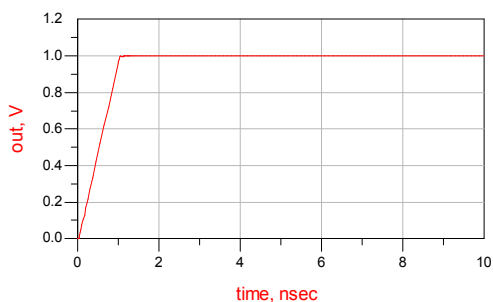


图 4-28 电感为 0.2nH 时的仿真结果

#### 4.2.2 RLC 电路的时域行为

为了观察 RLC 电路的时域行为，建立了如图 4-29 所示的电路模型，从仿真结果（见图 4-30）可以看到，当数字信号与互连线（它常常可以描述成理想 RLC 电路元件的组合）相互作用时，就产生正弦波。

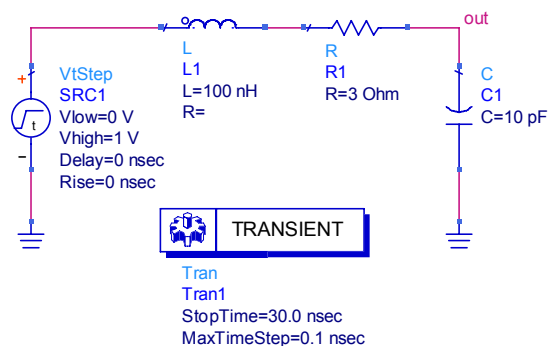


图 4-29 RLC 电路

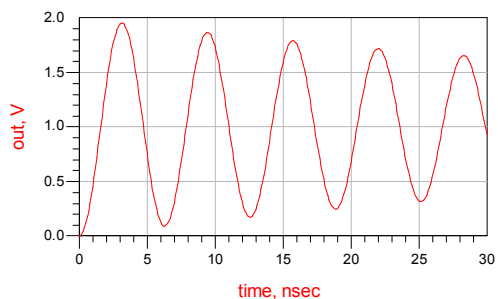


图 4-30 RLC 电路产生的正弦波

### 4.2.3 两焊盘间键合线回路的等效电路模型

本节仿真两焊盘间键合线回路的等效电路模型。

(1) 一阶模型如图 4-31 所示。

(2) 双击仿真器 S-PARAMETERS，在 Parameters 中选择 Z-parameters，如图 4-32 所示。

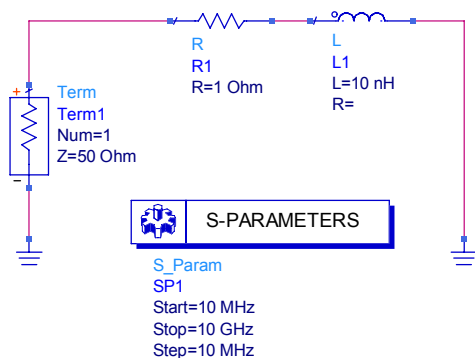


图 4-31 两焊盘间键合线回路的一阶等效电路模型

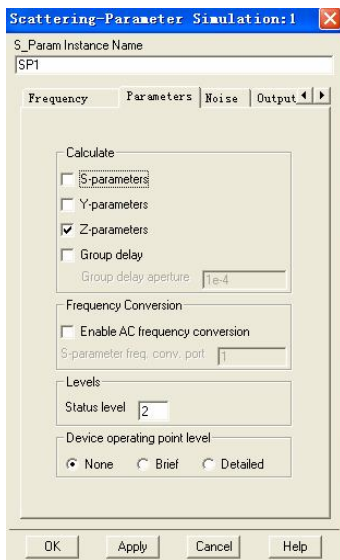


图 4-32 选择 Z-parameters

(3) 仿真结束后，单击画图按钮，出现红色画图框，如图 4-33 所示。在 Plot Type 选项卡中选择要画的项，添加到右边的栏中，如图 4-34 所示。选择 Plot Options 选项卡，选择 X Axis，在 Min 中填入 1e7，在 Scale 中选择 Log 坐标，如图 4-35 所示。

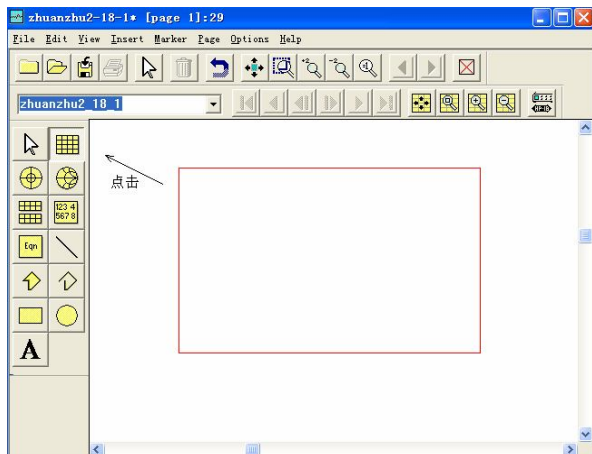


图 4-33 单击画图按钮

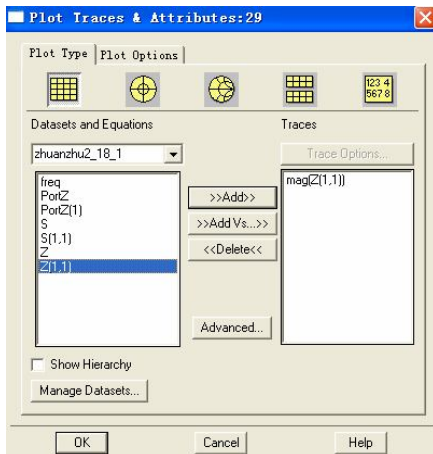


图 4-34 插入 Z(1,1)

选择 Y Axis，在 Min 中填入 1，在 Max 中填入 5e3，在 Scale 中选择 Log 坐标，如图 4-36 所示。阻抗结果如图 4-37 所示。

(4) 二阶模型如图 4-38 所示。



图 4-35 选择 X 轴 Log

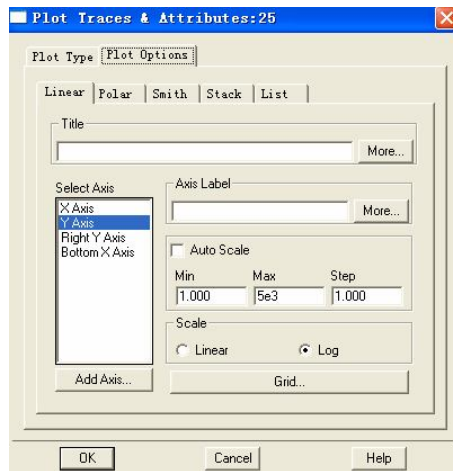


图 4-36 选择 Y 轴 Log

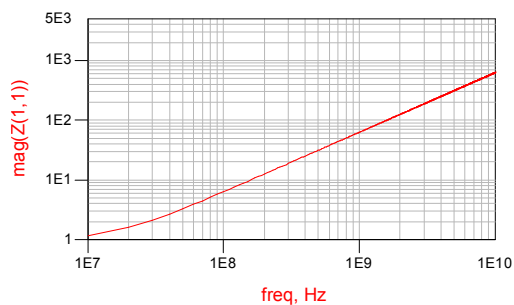


图 4-37 阻抗随频率的变化曲线

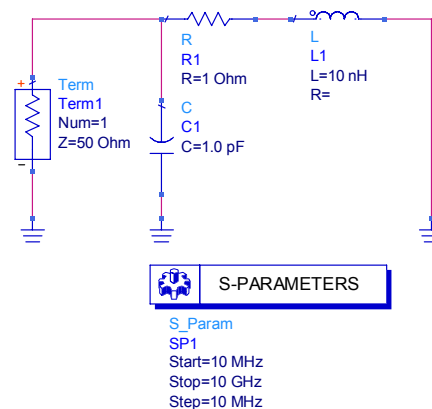


图 4-38 两焊盘间键合线回路的二阶等效电路模型

X 和 Y 轴的尺度改变如图 4-39 和图 4-40 所示。阻抗仿真结果如图 4-41 所示。

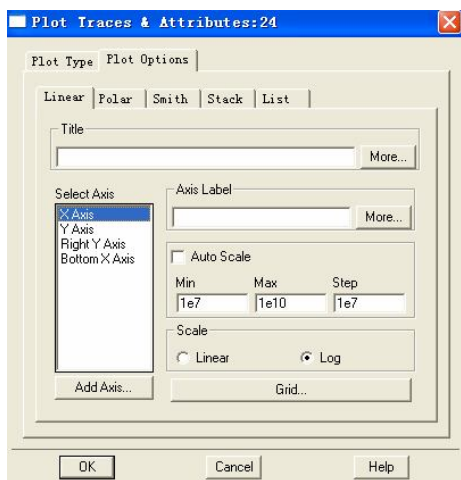


图 4-39 选择 X 轴 Log

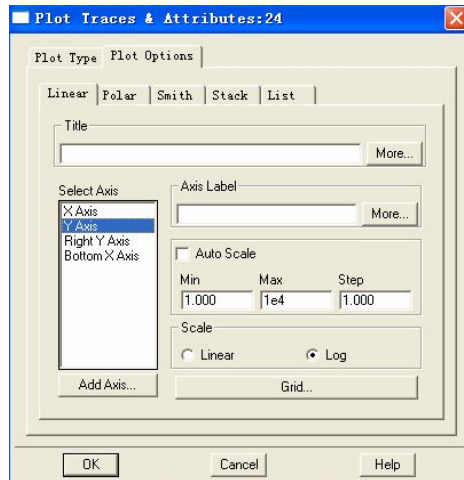


图 4-40 选择 Y 轴 Log

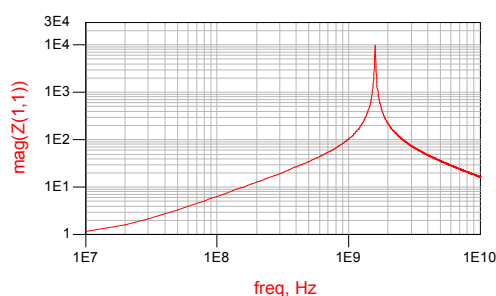


图 4-41 二阶模型时阻抗随频率的变化曲线

#### 4.2.4 去耦电容的等效电路模型

(1) 本节仿真去耦电容的等效电路模型，图 4-42 是用 ADS 建立的等效电路模型。

(2) 在图形中选择 Plot Options 选项卡，选择 X Axis，在 Min 中填入 1e7，在 Scale 中选择 Log 坐标，如图 4-43 和图 4-44 所示。

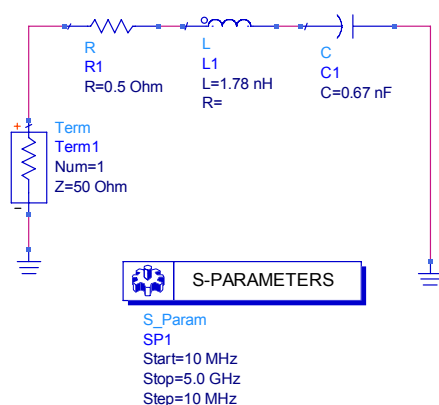


图 4-42 去耦电容的等效电路模型

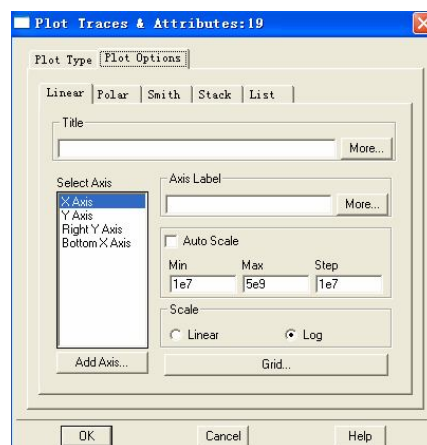


图 4-43 Plot Options 选项卡 X 轴

(3) 阻抗仿真结果如图 4-45 所示。

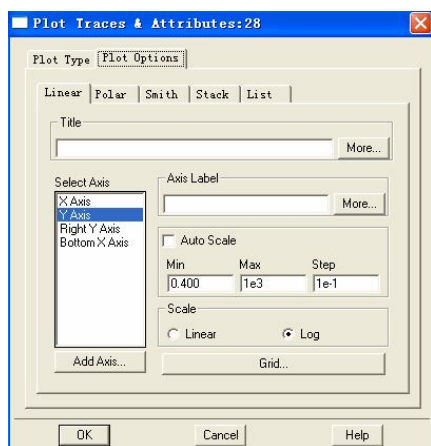


图 4-44 Plot Options 选项卡 Y 轴

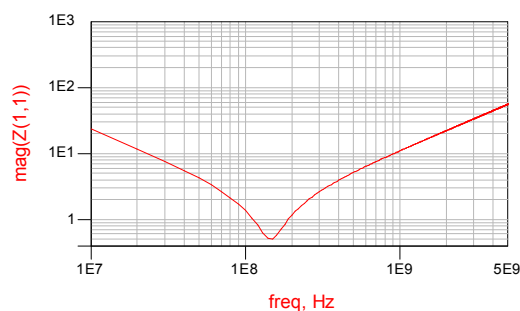


图 4-45 阻抗仿真结果

### 4.2.5 驱动器的等效电路模型

本节仿真驱动器的等效电路模型，电路图如图 4-46 所示。

仿真结果如图 4-47 所示。

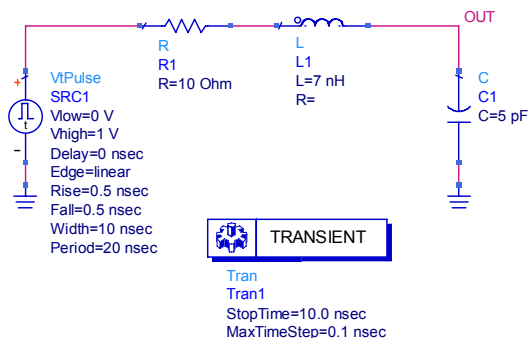


图 4-46 驱动器的等效电路

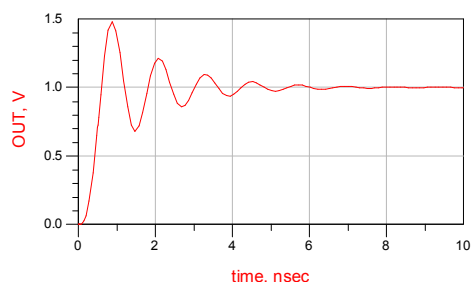


图 4-47 驱动器的仿真结果

如果减少电感（见图 4-48），振铃就将消失（见图 4-49）。

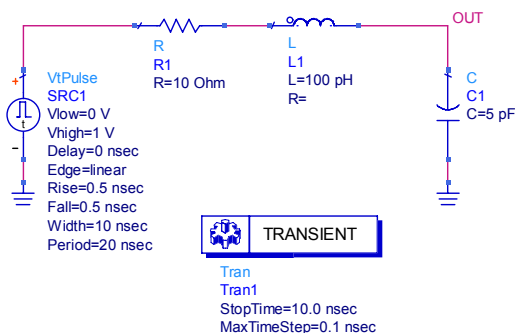


图 4-48 减小电感后的电路

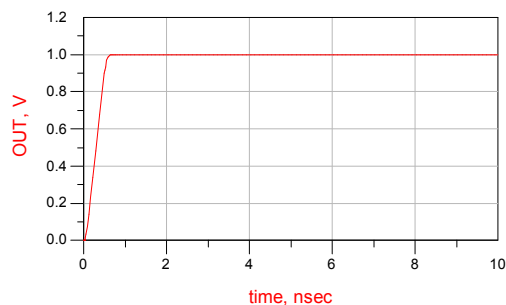


图 4-49 减小电感后的仿真结果

### 4.2.6 如何构造求阻抗的电路模型

本节介绍如何构造求阻抗的电路模型。方法是：构造一个幅度为 1A 的交流恒流源，测量电流源两端的电压就是这个电路的阻抗的直接测量。例如，只有一个电阻的情况如图 4-50 所示。仿真结果如图 4-51 所示。

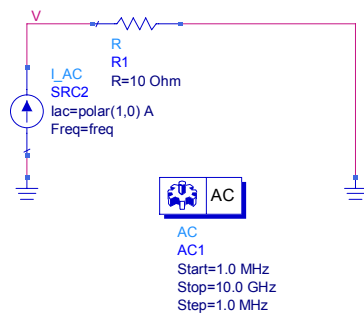


图 4-50 只有一个电阻的情况

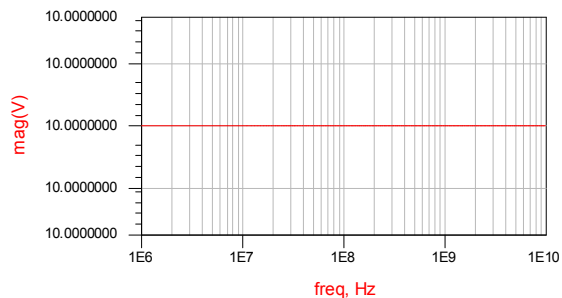


图 4-51 只有一个电阻的仿真结果

只有一个电感的情况如图 4-52 所示，仿真结果如图 4-53 所示。

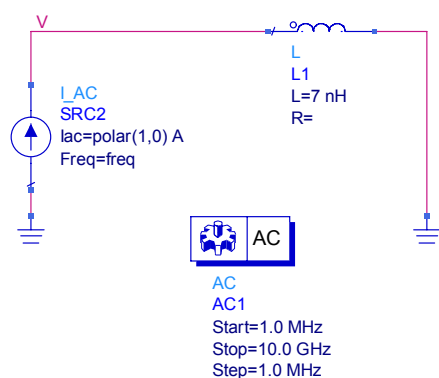


图 4-52 只有一个电感的情况

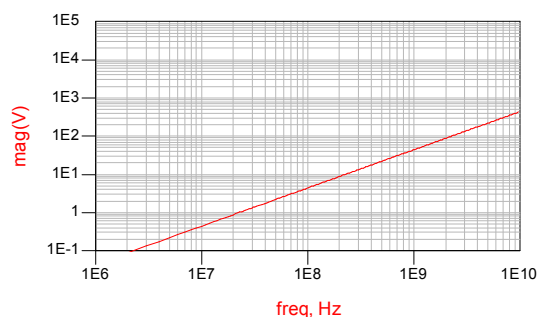


图 4-53 只有一个电感的仿真结果

只有一个电容的情况如图 4-54 所示，仿真结果如图 4-55 所示。

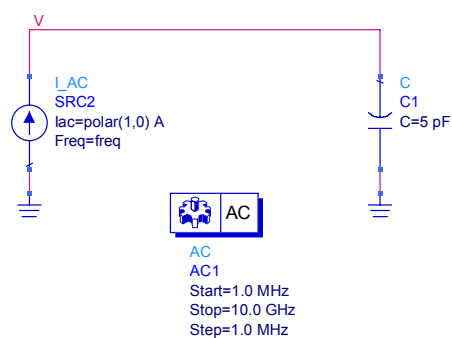


图 4-54 只有一个电容的情况

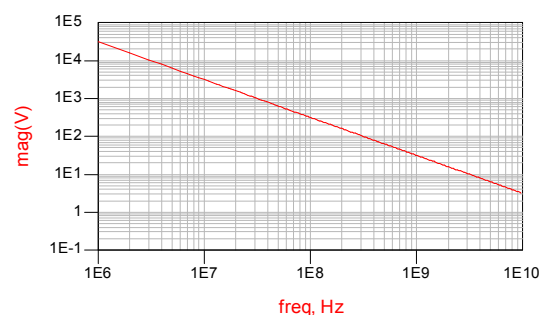


图 4-55 只有一个电容的仿真结果

电阻、电感、电容串联的情况如图 4-56 所示。

幅度仿真结果如图 4-57 所示。

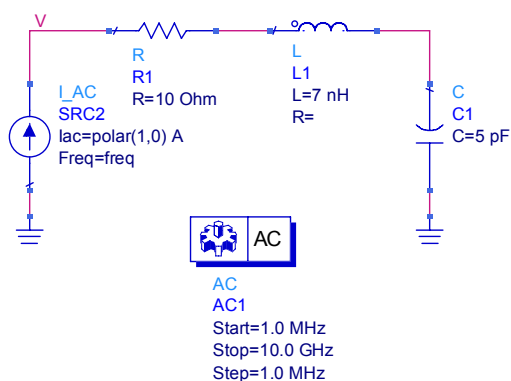


图 4-56 电阻、电感、电容串联的情况

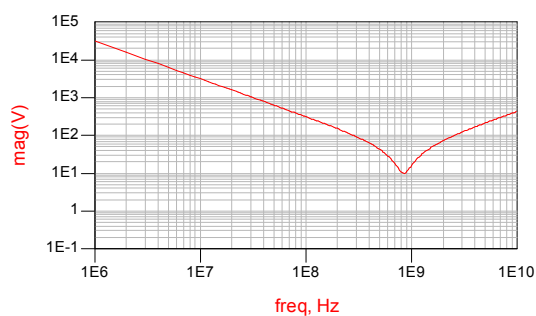


图 4-57 电阻、电感、电容串联的幅度仿真结果

相位仿真结果如图 4-58 所示。



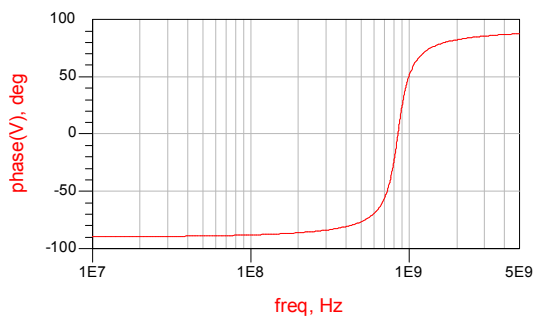


图 4-58 电阻、电感、电容串联的相位仿真结果

#### 4.2.7 传输线的等效电路模型

16 节 LC 集总电路模型如图 4-59 所示。仿真的阻抗特性曲线如图 4-60 所示。

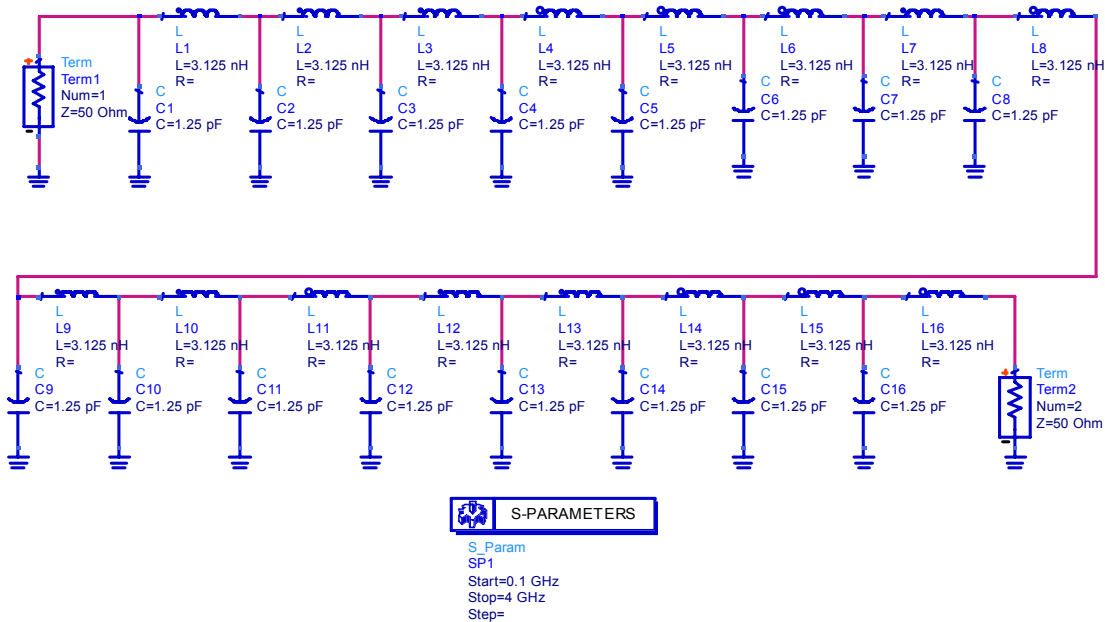


图 4-59 16 节 LC 集总电路模型

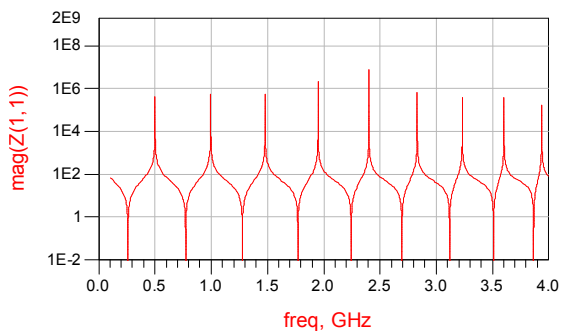


图 4-60 16 节 LC 集总电路模型的仿真阻抗

## 4.3 传输线的反射仿真

### 4.3.1 阻抗不匹配而产生的振铃

图 4-61 所示为输出端阻抗不匹配的情况，输出端的仿真结果如图 4-62 所示，由图可见，波形产生了振铃。

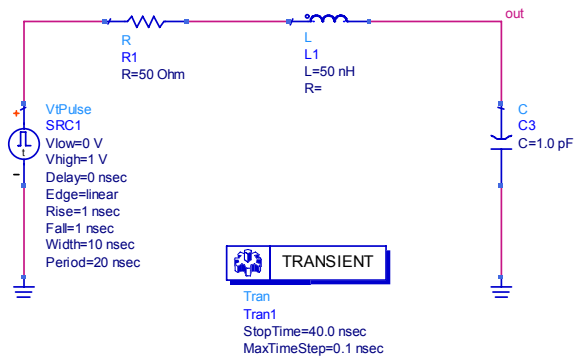


图 4-61 输出端阻抗不匹配的情况

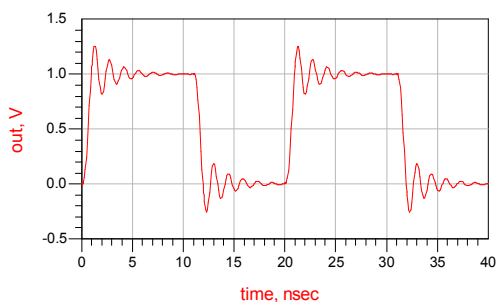


图 4-62 输出端产生了振铃

图 4-63 为输出端匹配的情况，仿真结果如图 4-64 所示，由图可见，振铃消失了。

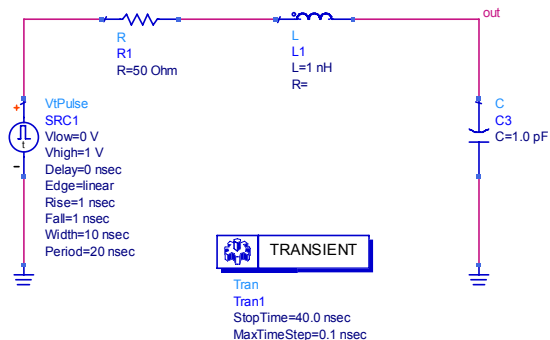


图 4-63 输出端匹配的情况

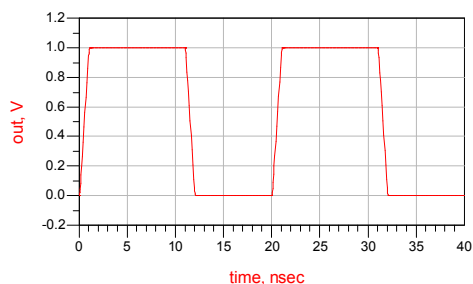


图 4-64 输出端振铃消失了

### 4.3.2 驱动源的内阻抗情况

图 4-65 所示为输出驱动器的简单模型，要观察输出开路 and 驱动  $10\Omega$  电阻的仿真结果。根据测

量结果来计算驱动源的内阻。驱动器输出开路模型如图 4-65 所示，仿真结果如图 4-66 所示。

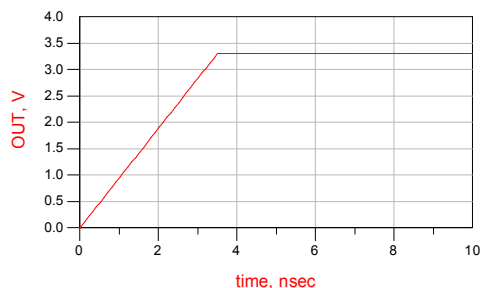
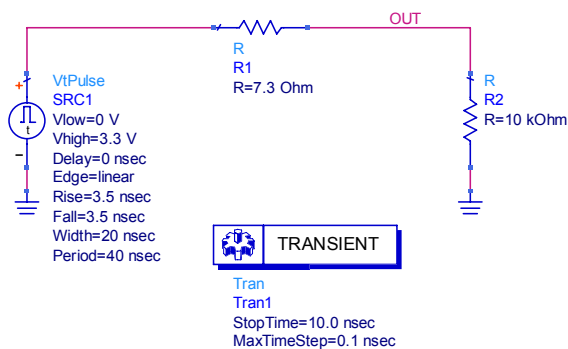


图 4-65 驱动器输出开路的模型

图 4-66 驱动器输出开路仿真结果

驱动器输出接  $10\Omega$  电阻的电路模型如图 4-67 所示，仿真结果如图 4-68 所示。

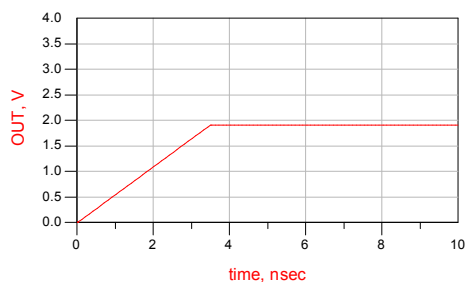
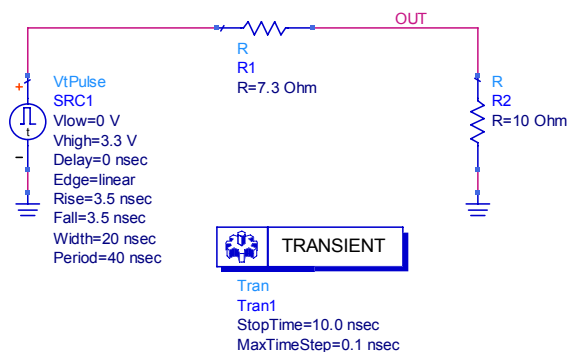


图 4-67 驱动器输出接  $10\Omega$  电阻的电路模型

图 4-68 驱动器输出接  $10\Omega$  电阻的仿真结果

### 4.3.3 反弹图仿真

本节建立反弹图的模型并仿真。如何从图 8.9 中的参数转换成 ADS 中的参数？在图 8.9 中， $1\text{ns} \times 3\text{e}8 = 0.3\text{m}$ ，对应 ADS 中， $\lambda = 4 \times 0.3 = 1.2\text{m}$ （电尺寸  $E=90^\circ$ ，即  $1/4$  波长），所以  $f = 3\text{e}8 / 1.2 = 250\text{MHz}$ 。

电路原理图如图 4-69 所示。

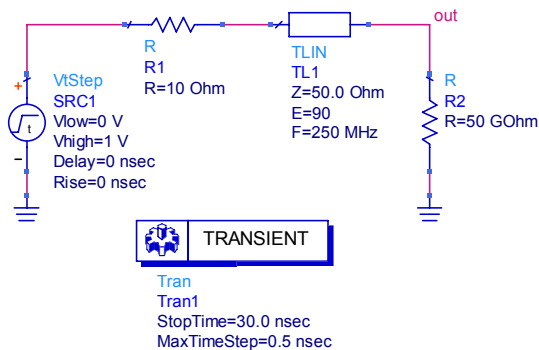


图 4-69 反弹图电路模型

仿真结果如图 4-70 所示。

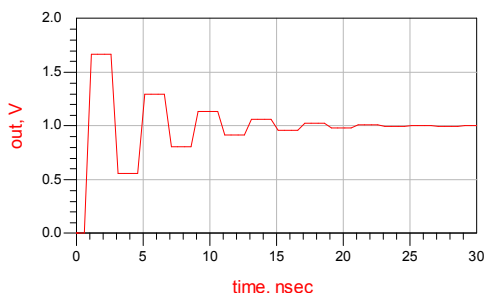


图 4-70 反弹图仿真结果

#### 4.3.4 反射波形仿真

原理图见图 4-71。传输线频率 800MHz，改变信号上升时间从 0.1ns 到 1.5ns，仿真结果分别如图 4-72、图 4-73 和图 4-74 所示。

上升时间为 0.1ns 时的仿真结果如图 4-72 所示。

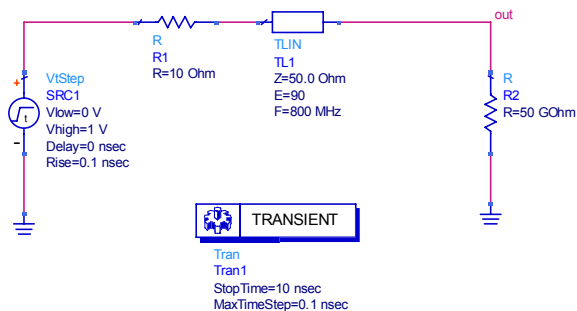


图 4-71 反射波形仿真原理图

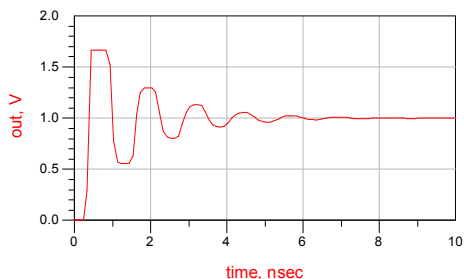


图 4-72 上升时间为 0.1ns 时的仿真结果

上升时间为 0.5ns 时的仿真结果如图 4-73 所示。

上升时间为 1.5ns 时的仿真结果如图 4-74 所示。

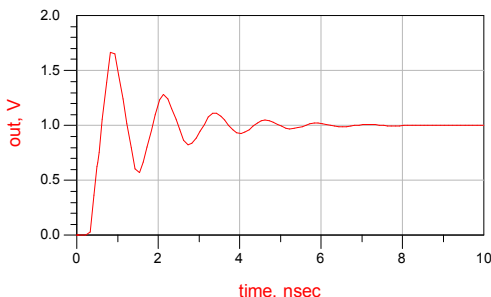


图 4-73 上升时间为 0.5ns 时的仿真结果

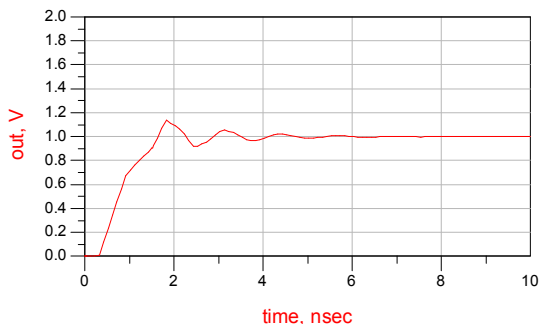


图 4-74 上升时间为 1.5ns 时的仿真结果

上升时间改为 0.5ns，源端串联电阻  $R$ ，原理图如图 4-75 所示，当  $R=0\Omega$ 、 $40\Omega$ 、 $90\Omega$  时的仿真结果分别如图 4-76、图 4-77 和图 4-78 所示。

当  $R=0\Omega$  时的结果如图 4-76 所示。

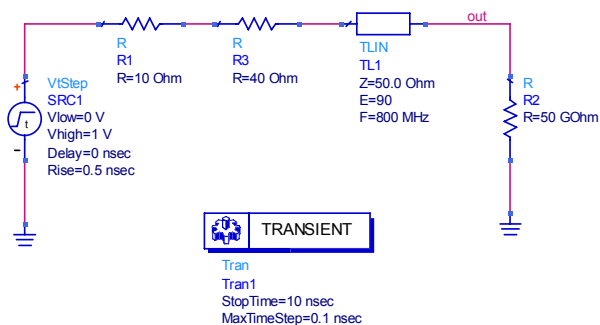


图 4-75 原理图

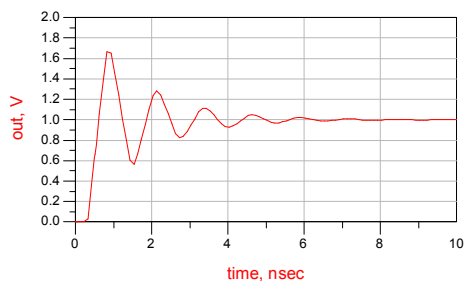


图 4-76  $R=0\Omega$  时的仿真结果

当  $R=40\Omega$  时的结果如图 4-77 所示。

当  $R=90\Omega$  时的结果如图 4-78 所示。

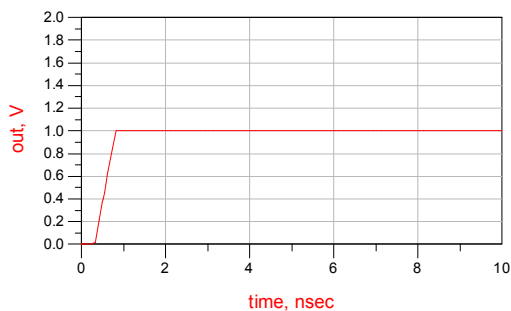


图 4-77  $R=40\Omega$  时的仿真结果

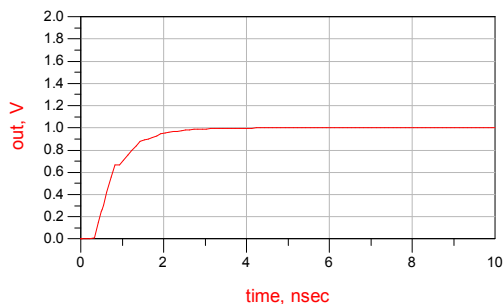


图 4-78  $R=90\Omega$  时的仿真结果

### 4.3.5 仿真 TDR 测量原理

本节仿真 TDR 测量原理。

(1) DUT 匹配情况：原理图如图 4-79 所示，仿真结果如图 4-80 所示。

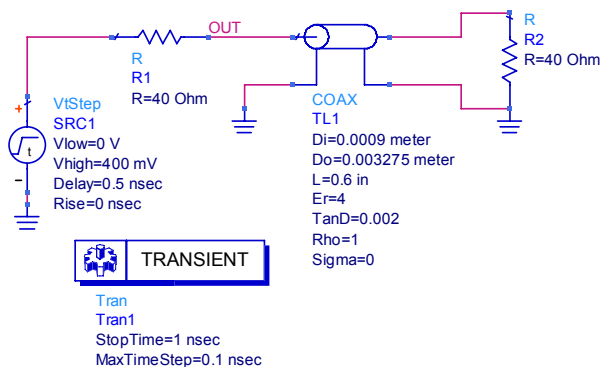


图 4-79 DUT 匹配情况原理图

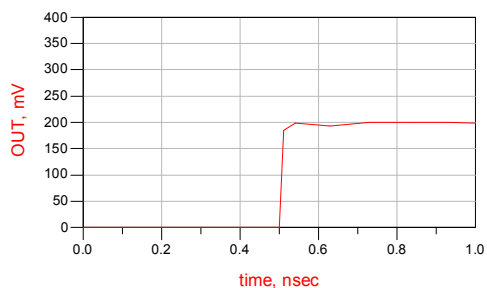


图 4-80 DUT 匹配情况仿真结果

(2) DUT 开路情况：原理图如图 4-81 所示，仿真结果如图 4-82 所示。

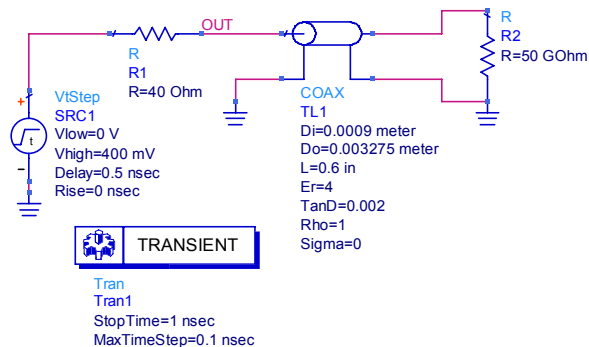


图 4-81 DUT 开路情况原理图

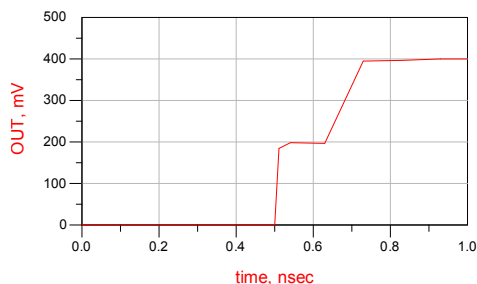


图 4-82 DUT 开路情况仿真结果

(3) DUT 短路情况：原理图如图 4-83 所示，仿真结果如图 4-84 所示。

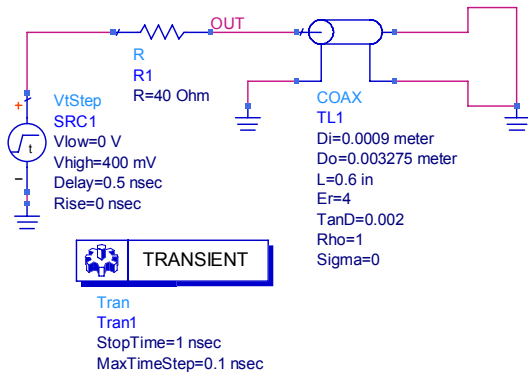


图 4-83 DUT 短路情况原理图

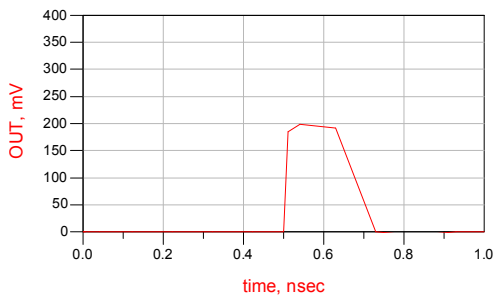
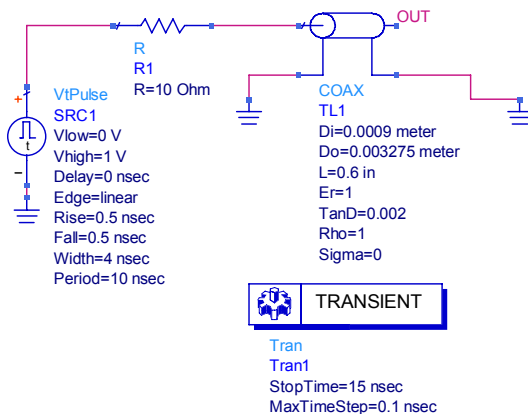
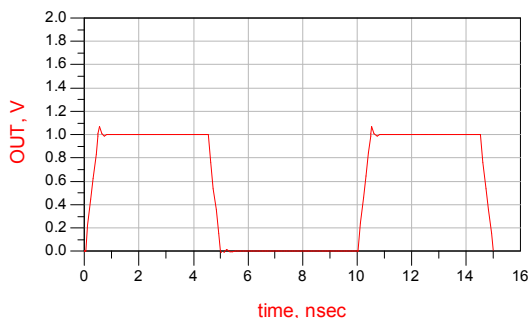


图 4-84 DUT 短路情况仿真结果

#### 4.3.6 何时需要端接

当  $RT=0.5\text{ns}$  时， $TD=20\%RT=0.6\text{in}$  的原理图和仿真结果如图 4-85 和图 4-86 所示。

图 4-85  $TD=0.6\text{in}$  时的电路图图 4-86  $TD=0.6\text{in}$  时的仿真结果

$TD=30\%RT=0.9\text{in}$  的原理图和仿真结果如图 4-87 和图 4-88 所示。

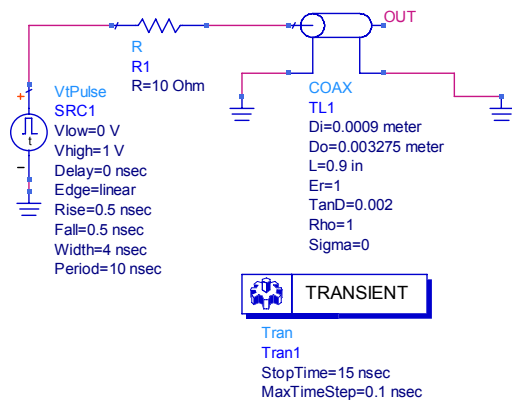


图 4-87 TD=0.9in 时的原理图

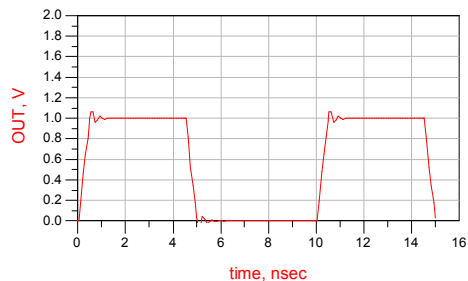


图 4-88 TD=0.9in 时的仿真结果

TD = 40%RT = 1.2in 的原理图和仿真结果如图 4-89 和图 4-90 所示。

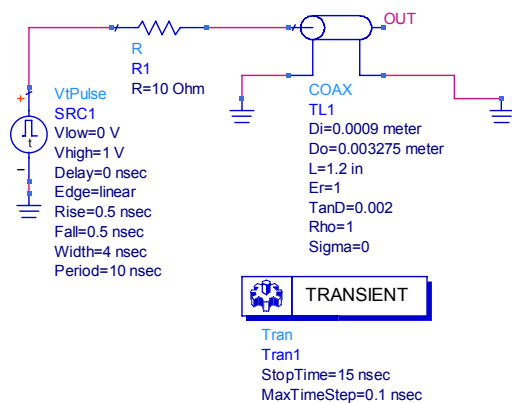


图 4-89 TD=1.2in 时的原理图

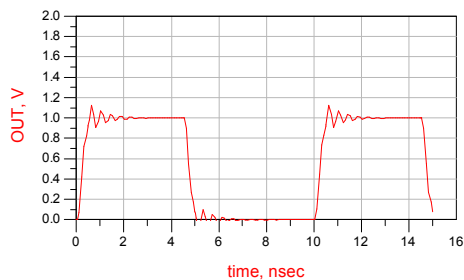


图 4-90 TD=1.2in 时的仿真结果

### 4.3.7 源端端接

源端端接，如图 4-91 所示，仿真结果如图 4-92 所示。

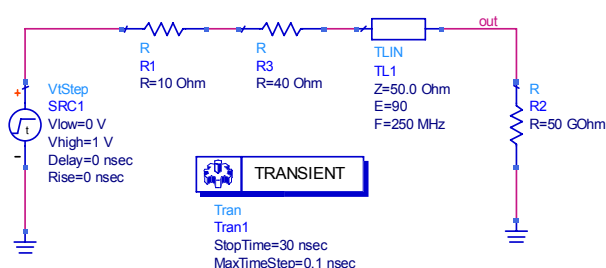


图 4-91 源端端接图

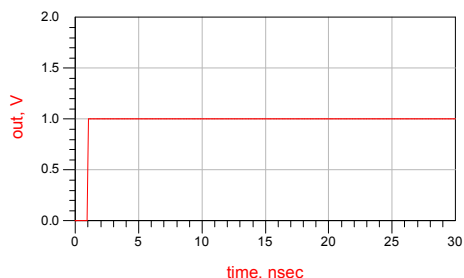


图 4-92 源端端接的仿真结果

### 4.3.8 源端端接情况下的传输线增加

光速=0.3m/ns=12in/ns, 1ns 传输线长度对应 0.3m, 对应传输线频率 F=250MHz。



计算方法: 根据传输线参数, 传输线长度=  $v/(F/4) = 0.3/(0.25/4) = 0.3$ 。因此图 4-93 满足  $2 \times TD = 2\text{ns}$ 。仿真结果如图 4-94 所示。

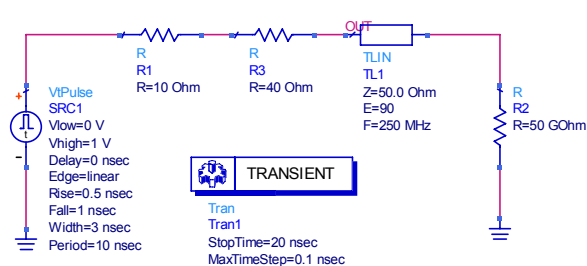
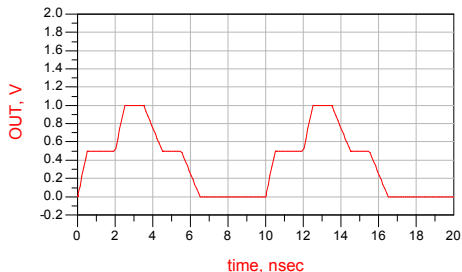
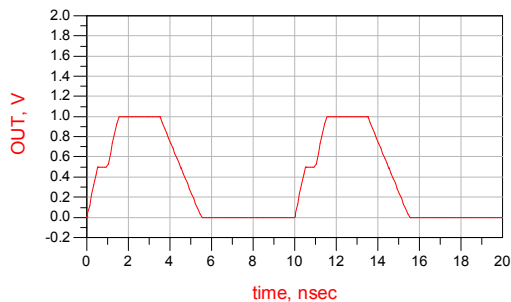
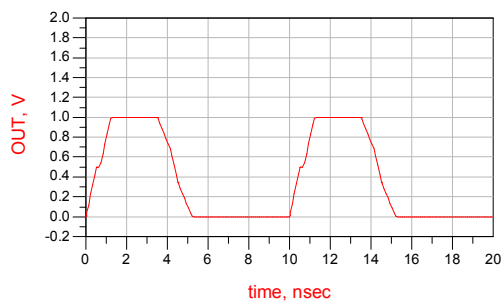


图 4-93 原理图

图 4-94 满足  $2 \times TD = 2\text{ns}$  的仿真结果

传输线频率改为  $F=500\text{MHz}$ , 传输线长度=  $0.5\text{ns}$ , 仿真结果如图 4-95 所示。

传输线频率改为  $F=714\text{MHz}$ , 传输线长度=  $0.35\text{ns}$ , 仿真结果如图 4-96 所示。

图 4-95 满足  $2 \times TD = 1\text{ns}$  的仿真结果图 4-96 满足  $2 \times TD = 0.7\text{ns}$  的仿真结果

### 4.3.9 短串接传输线的反射

在传输线中, 中间有一段阻抗的突变, 如图 4-97 所示。当突变阻抗分别为  $25\Omega$ 、 $50\Omega$  和  $75\Omega$  时对输入输出波形进行仿真。

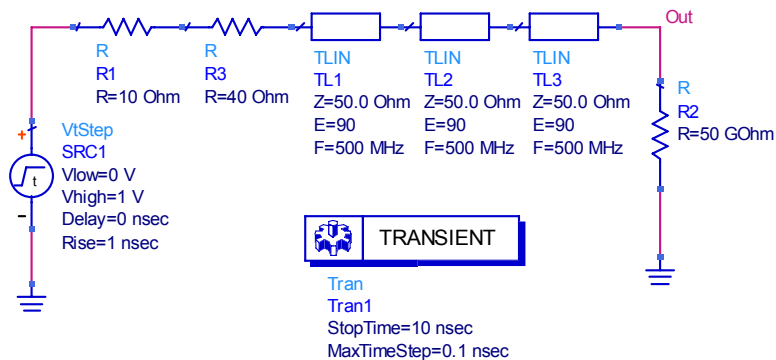


图 4-97 中间有一段阻抗突变的传输线

没有阻抗突变时输入、输出的仿真结果分别如图 4-98 和图 4-99 所示。

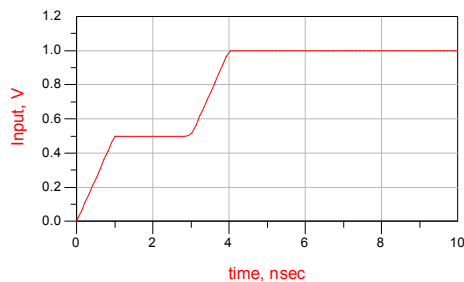


图 4-98 没有阻抗突变时输入的仿真结果

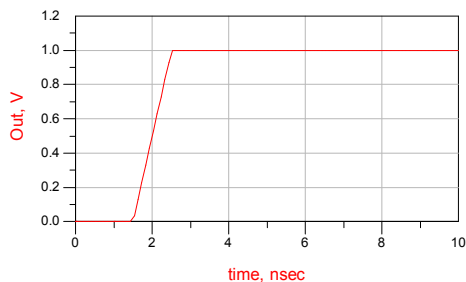


图 4-99 没有阻抗突变时输出的仿真结果

技巧：在同一张图上显示三条线的实现方法

- 1) 先计算一固定值的结果，如 TL2 的  $Z=75\Omega$  的结果。
- 2) 选中传输线 TL2，如图 4-100 所示。
- 3) 在 Simulate 中单击 Tuning...，改变 TL2 的值为  $50\Omega$  和  $25\Omega$ ，如图 4-101 所示，即可得到三条曲线，如图 4-102 和图 4-103 所示。

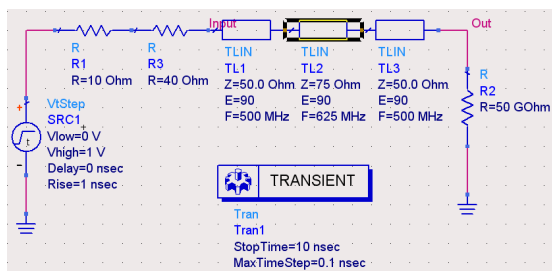


图 4-100 选中  $75\Omega$

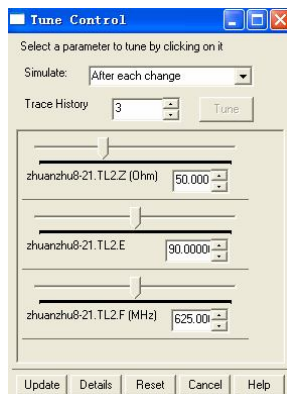


图 4-101 改变 TL2 的值

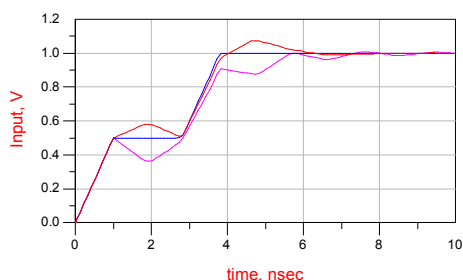


图 4-102 不同突变阻抗的输入结果

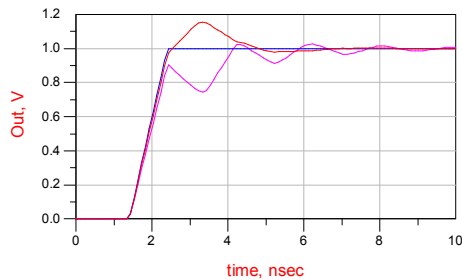


图 4-103 不同突变阻抗的输出结果

中间传输线  $25\Omega$  和  $75\Omega$  的仿真结果如图 4-102 和图 4-103 所示，向下凹是  $25\Omega$  的仿真结果，向上凸是  $75\Omega$  的仿真结果。

#### 4.3.10 短串接传输线的反射（续）

当突变阻抗固定为  $25\Omega$  而时延不同时，对输入输出波形进行仿真，如图 4-104 所示。

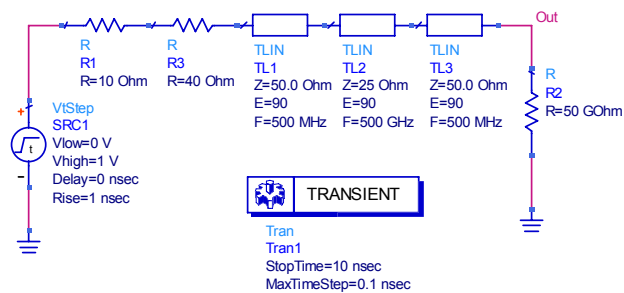
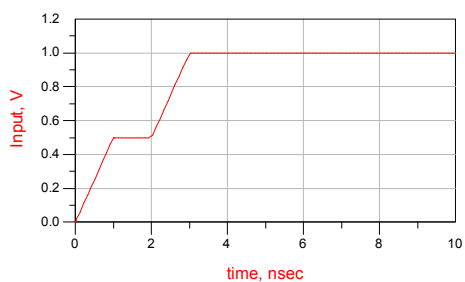
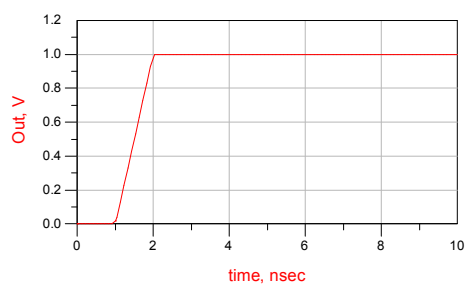
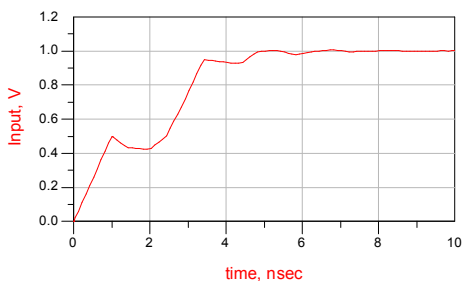
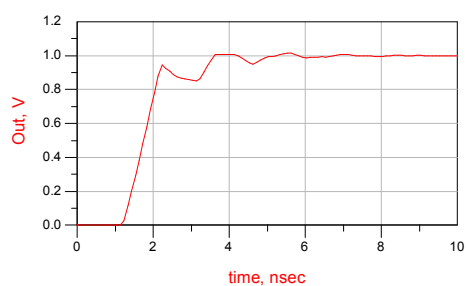


图 4-104 中间突变为 25Ω 时的原理图

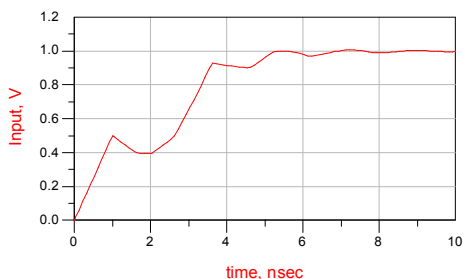
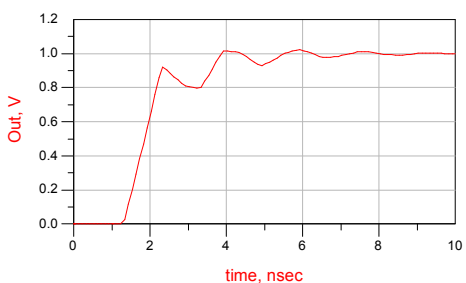
(1)  $TD=0\%RT$ ，可设中间传输线  $F=500\text{GHz}$ ，仿真结果如图 4-105 和图 4-106 所示。

图 4-105  $TD=0\%RT$  时仿真的输入波形图 4-106  $TD=0\%RT$  时仿真的输出波形

(2)  $TD=20\%RT=0.2\text{ns}$ ，可设中间传输线  $F=1250\text{MHz}$ ，仿真结果如图 4-107 和图 4-108 所示。

图 4-107  $TD=20\%RT=0.2\text{ns}$  时的输入波形图 4-108  $TD=20\%RT=0.2\text{ns}$  时的输出波形

(3)  $TD=30\%RT=0.3\text{ns}$ ，可设中间传输线  $F=833\text{MHz}$ ，仿真的波形如图 4-109 和图 4-110 所示。

图 4-109  $TD=30\%RT=0.3\text{ns}$  时的输入波形图 4-110  $TD=30\%RT=0.3\text{ns}$  时的输出波形

(4)  $TD=40\%RT=0.4ns$ ，可设中间传输线  $F=625MHz$ ，仿真结果如图 4-111 和图 4-112 所示。

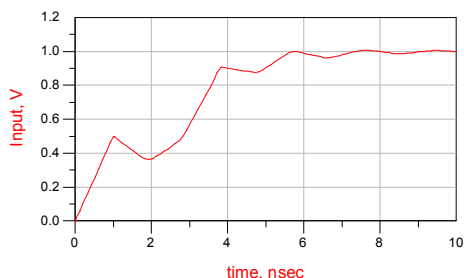


图 4-111  $TD=40\%RT=0.4ns$  时的输入波形

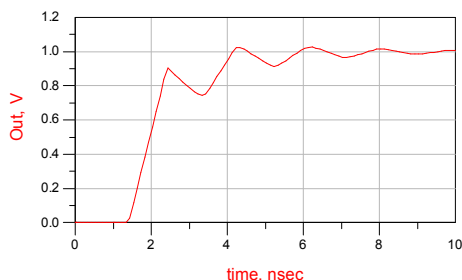


图 4-112  $TD=40\%RT=0.4ns$  时的输出波形

### 4.3.11 短桩线的反射

本节仿真短桩线传输线的反射。短桩线突变处阻抗为  $50\Omega$ ，时延不同时对输入输出波形进行仿真，如图 4-113 所示。

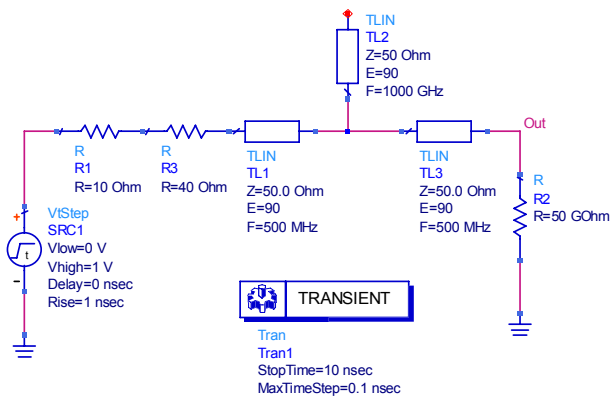


图 4-113 短桩线突变的原理图

(1)  $TD=0\%RT=0ns$ ，仿真结果如图 4-114 和图 4-115 所示。

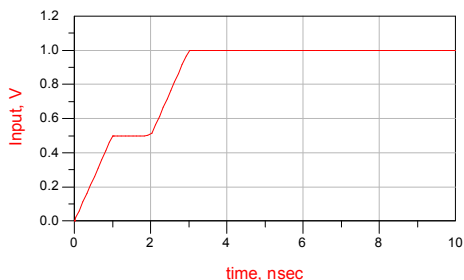


图 4-114  $TD=0\%RT=0ns$  时的输入波形

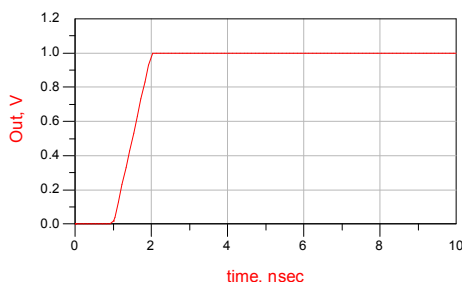


图 4-115  $TD=0\%RT=0ns$  时的输出波形

(2)  $TD=20\%RT=0.2ns$ ，可设中间传输线  $F=1250MHz$ ，仿真结果如图 4-116 和图 4-117 所示。

(3)  $TD=40\%RT=0.4ns$ ，可设中间传输线  $F=625MHz$ ，仿真结果如图 4-118 和图 4-119 所示。

(4)  $TD=60\%RT=0.6ns$ ，可设中间传输线  $F=417MHz$ ，仿真结果如图 4-120 和图 4-121 所示。

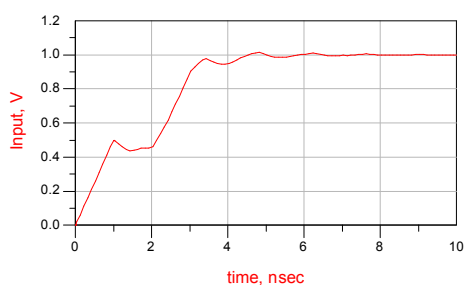


图 4-116 TD=20%RT=0.2ns 时的输入波形

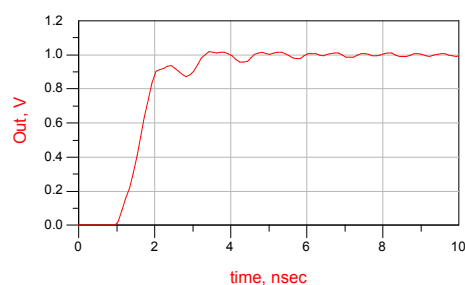


图 4-117 TD=20%RT=0.2ns 时的输出波形

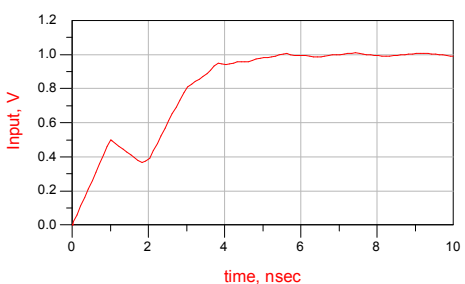


图 4-118 TD=40%RT=0.4ns 时的输入波形

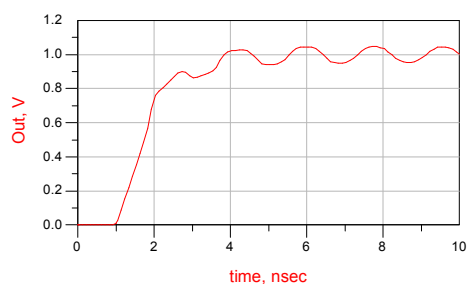


图 4-119 TD=40%RT=0.4ns 的输出波形

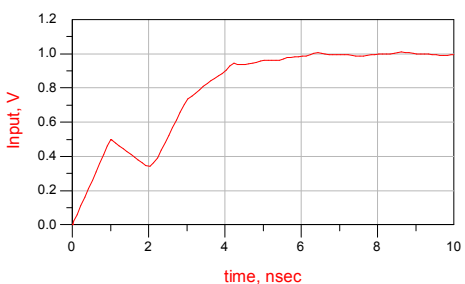


图 4-120 TD=60%RT=0.6ns 时的输入波形

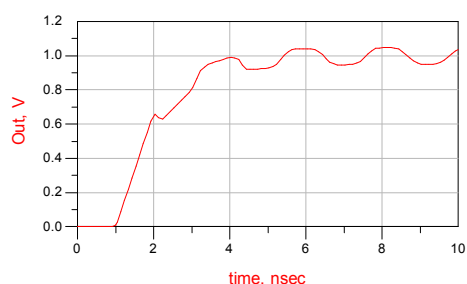


图 4-121 TD=60%RT=0.6ns 时的输出波形

### 4.3.12 容性终端负载的反射

本节仿真容性终端负载的反射。电容终端负载分别为 0pF, 2pF, 5pF 和 10pF 时, 仿真输入输出波形。原理图如图 4-122 所示。

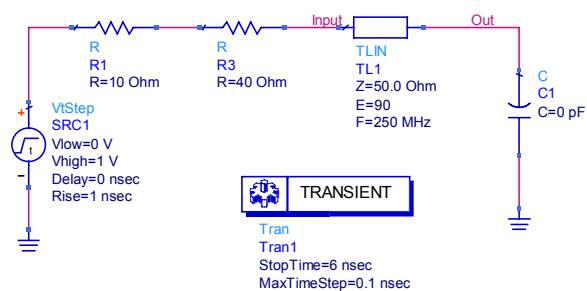


图 4-122 容性终端负载原理图

(1)  $C=0\text{pF}$  时, 仿真结果如图 4-123 和图 4-124 所示。

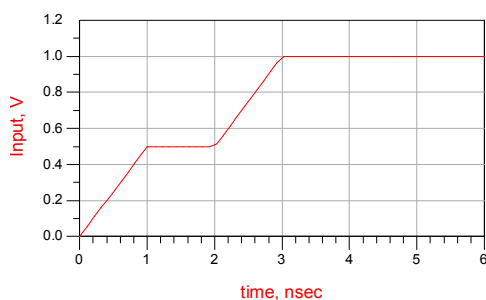


图 4-123  $C=0\text{pF}$  时的输入波形

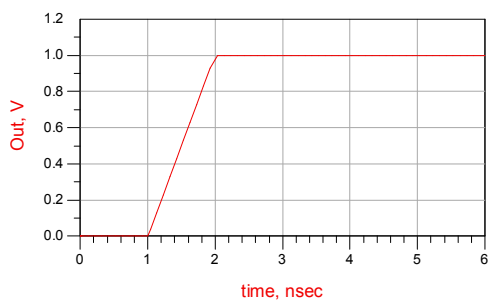


图 4-124  $C=0\text{pF}$  时的输出波形

(2) 电容  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的仿真结果如图 4-125 和图 4-126 所示。

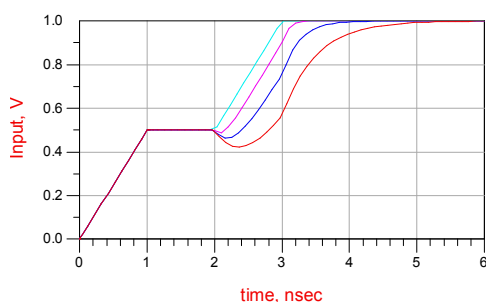


图 4-125 电容  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的输入波形

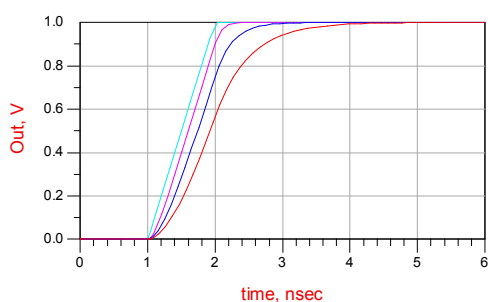


图 4-126 电容  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的输出波形

### 4.3.13 连线中途的容性负载反射

本节仿真连线中途容性负载的反射。连线中途电容突变量分别为  $0\text{pF}$ 、 $2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$  和  $10\text{pF}$  时, 仿真输入输出波形。原理图如图 4-127 所示。

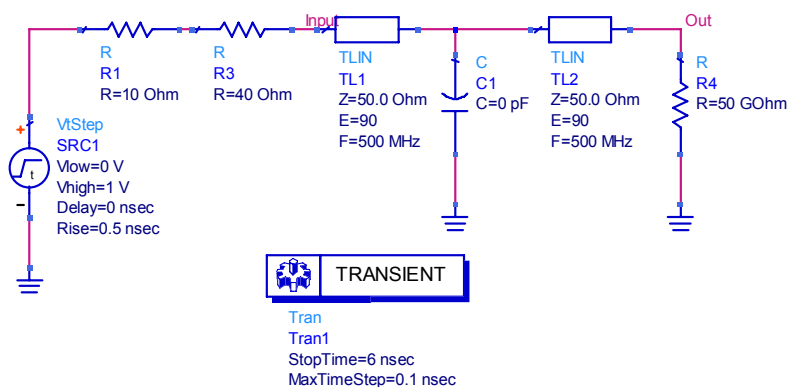
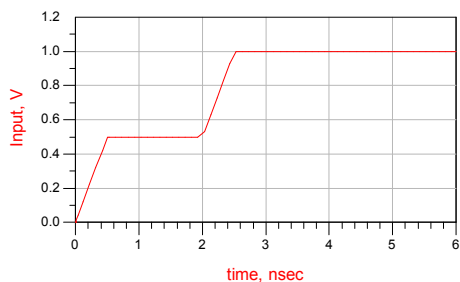
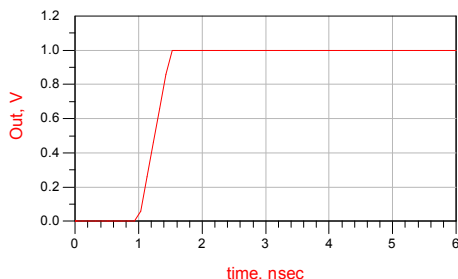
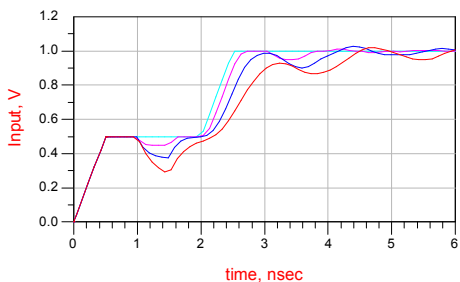
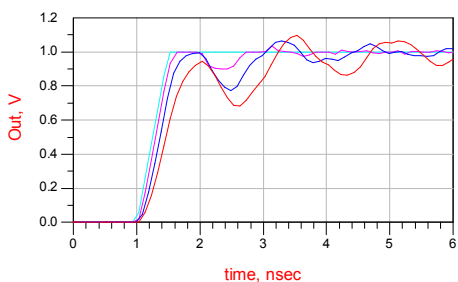


图 4-127 连线中途容性负载反射的原理图

(1) 突变电容为  $C=0\text{pF}$  时的仿真结果如图 4-128 和图 4-129 所示。

(2) 突变电容为  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的仿真结果如图 4-130 和图 4-131 所示。

图 4-128 突变电容为  $C=0\text{pF}$  时的输入波形图 4-129 突变电容为  $C=0\text{pF}$  时的输出波形图 4-130 突变电容为  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的输入结果图 4-131 突变电容为  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$ 、 $10\text{pF}$  时的输出结果

#### 4.3.14 容性时延累加

本节研究容性时延累加问题。当负载电容分别为  $0\text{pF}$ 、 $2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$  和  $10\text{pF}$  时，仿真输出端的电压波形。原理图如图 4-132 所示。

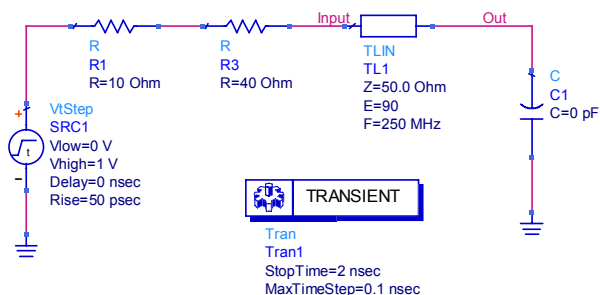


图 4-132 容性时延累加原理图

- (1)  $C=0\text{pF}$  时的输出仿真结果如图 4-133 所示。
- (2)  $C=2\text{pF}$ 、 $5\text{pF}$  和  $10\text{pF}$  时的输出仿真结果如图 4-134 所示。

#### 4.3.15 有载线

有载线上  $3\text{pF}$  电容间的时延为  $0.15\text{ns}$ ，仿真其上的反射信号，如图 4-135 所示。

- (1)  $R_T=0.05\text{ns}$  时的反射信号的波形如图 4-136 所示。
- (2)  $R_T=0.15\text{ns}$  时的反射信号如图 4-137 所示。



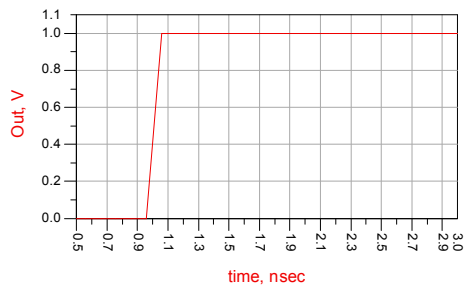


图 4-133 C=0pF 时的输出仿真结果

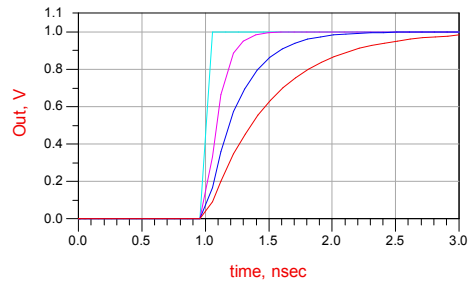


图 4-134 C=2 pF、5 pF 和 10 pF 时的输出仿真结果

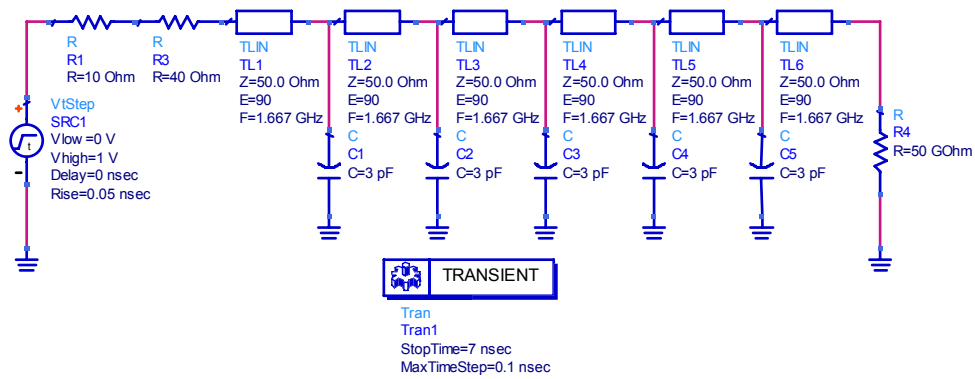


图 4-135 有载线的原理图

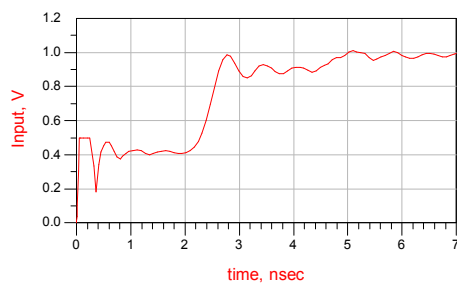


图 4-136 RT=0.05ns 时的反射信号

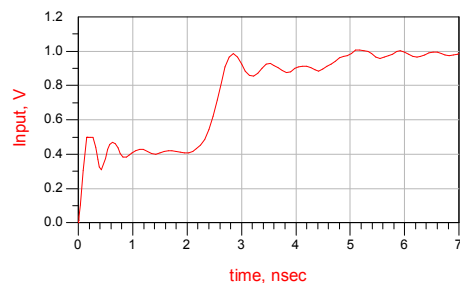


图 4-137 RT=0.15ns 时的反射信号

(3) RT=0.5ns 时的反射信号如图 4-138 所示。

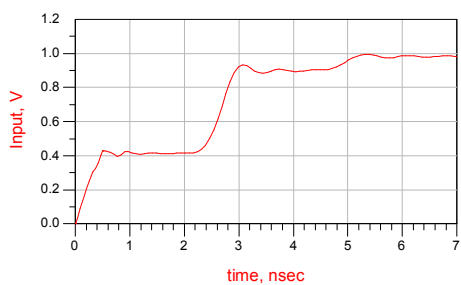


图 4-138 RT=0.5ns 时的反射信号

(4) 无载线情况，无载线情况的原理图如图 4-139 所示。令所有的  $C=0\text{pF}$ ，上升时间 $=0.5\text{ns}$ ，仿真的反射信号如图 4-140 所示。

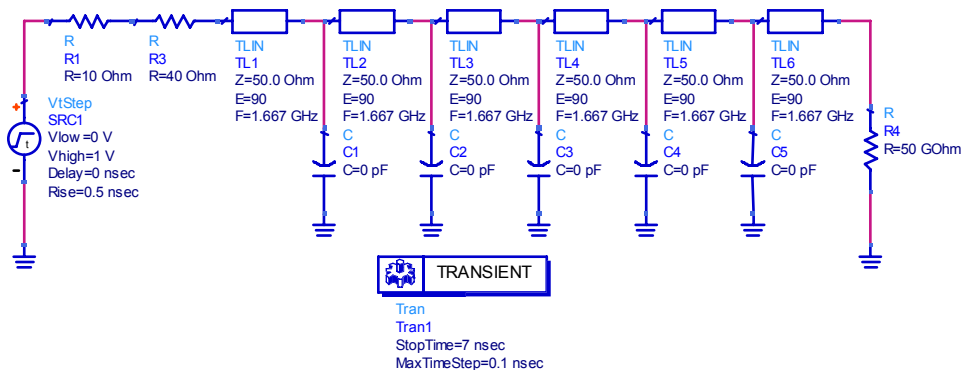


图 4-139 无载线的原理图

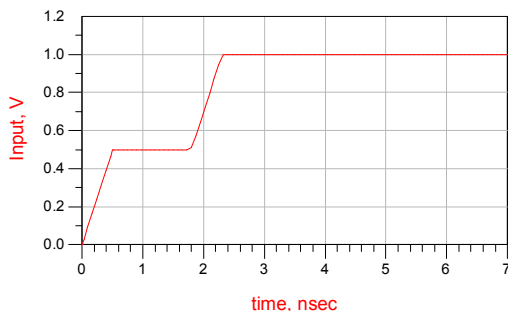


图 4-140 无载线的反射信号

#### 4.3.16 感性突变产生的反射

当传输线有感性突变时，仿真输入和输出波形。原理图如图 4-141 所示。

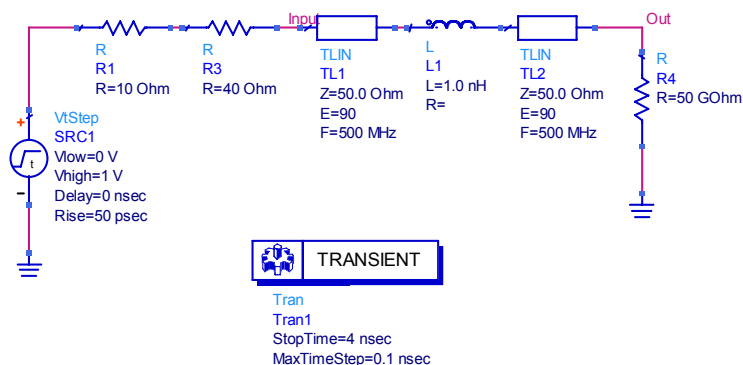


图 4-141 感性突变产生的反射原理图

- (1) 电感  $L=0\text{nH}$  时的输入和输出波形如图 4-142 和图 4-143 所示。
- (2) 电感  $L=1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时的结果如图 4-144 和图 4-145 所示。

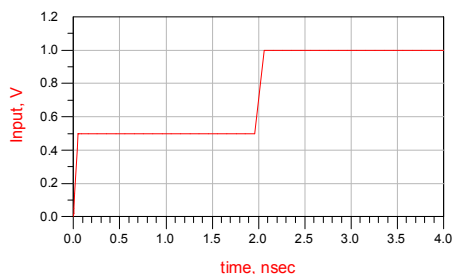


图 4-142 电感  $L=0\text{nH}$  时的输入结果

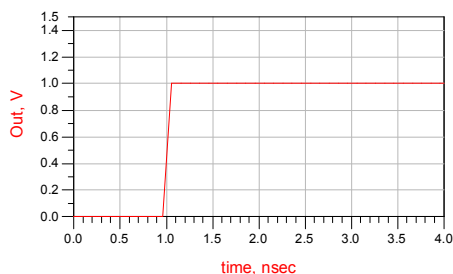


图 4-143 电感  $L=0\text{nH}$  时的输出结果

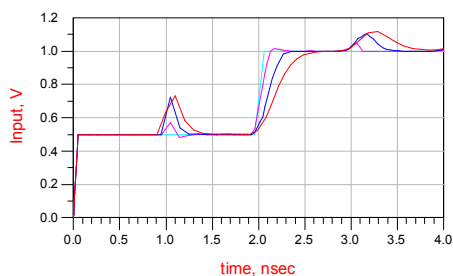


图 4-144 电感  $L=1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时的输入结果

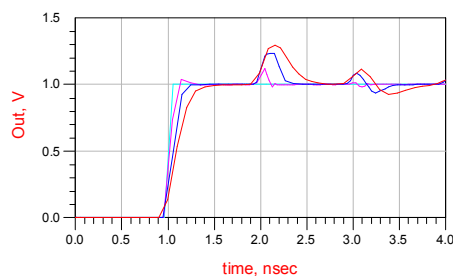


图 4-145 电感  $L=1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时的输出结果

#### 4.3.17 感性时延累加

当感性突变为  $0\text{nH}$ 、 $1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时，仿真接收信号的时延累加。原理图如图 4-146 所示，只需要在图 4-141 基础上修改截止时间和时间步长即可。

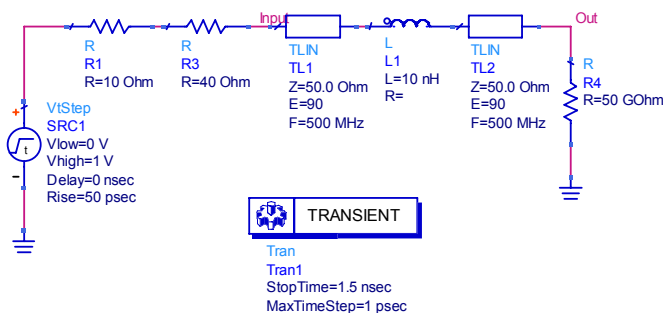


图 4-146 感性时延累加原理图

(1) 电感  $L=0\text{nH}$  时的结果如图 4-147 所示。

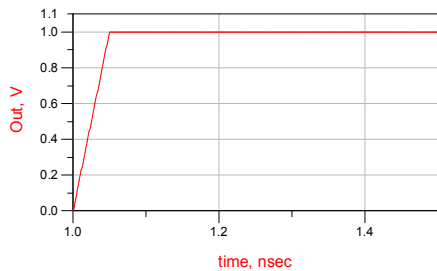


图 4-147 电感  $L=0\text{nH}$  时的结果

(2) 电感  $L=1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时的结果如图 4-148 所示。

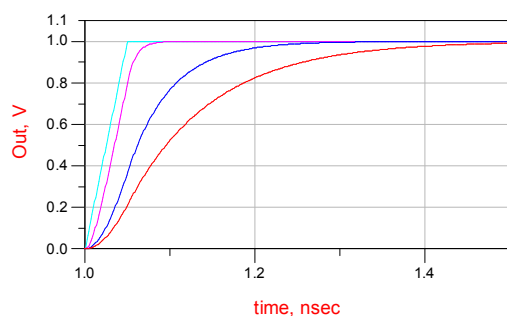


图 4-148 电感  $L=1\text{nH}$ 、 $5\text{nH}$ 、 $10\text{nH}$  时的结果

### 4.3.18 补偿

当有感性突变时，可以采取补偿的方法。仿真的原理图如图 4-149 所示。

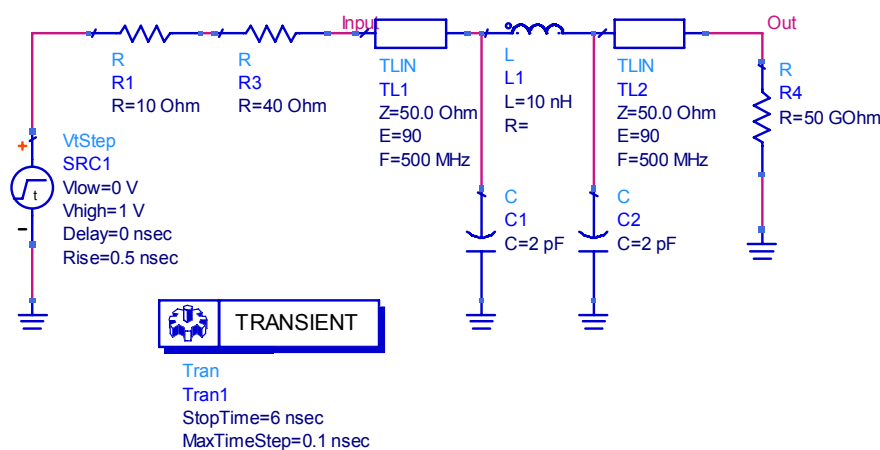


图 4-149 用于感性突变的补偿电路

(1) 没有接插件的仿真结果如图 4-150 和图 4-151 所示。

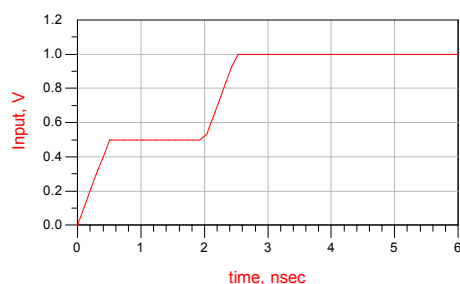


图 4-150 没有接插件的输入结果

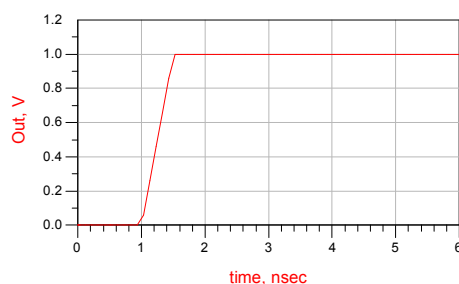


图 4-151 没有接插件的输出结果

(2) 有接插件没有补偿电容的结果如图 4-152 和图 4-153 所示。

(3) 有接插件有补偿电容的结果如图 4-154 和图 4-155 所示。

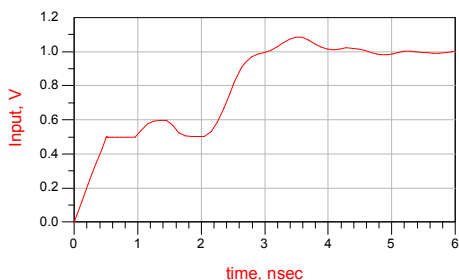


图 4-152 有接插件没有补偿电容的输入结果

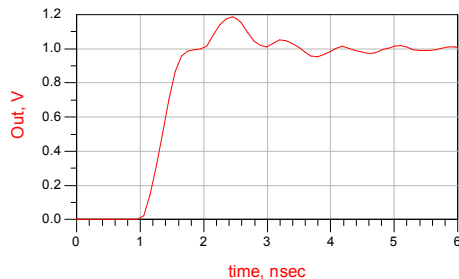


图 4-153 有接插件没有补偿电容的输出结果

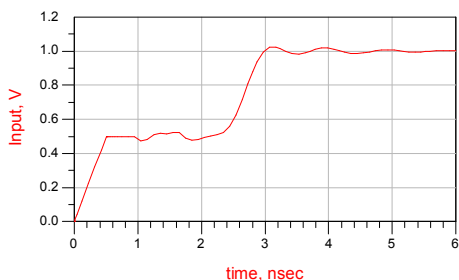


图 4-154 有接插件有补偿电容的输入结果

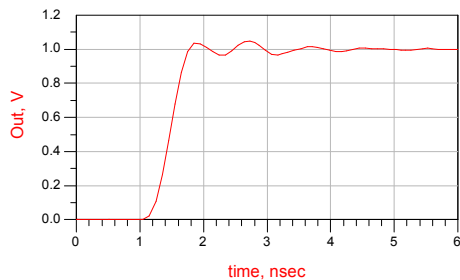


图 4-155 有接插件有补偿电容的输出结果

## 4.4 考虑损耗时的仿真

### 4.4.1 信号的损耗

经过 50Ω、36in 长的传输线的输入和输出信号。原理图如图 4-156 所示。注意参数设置。仿真的输入信号和输出信号如图 4-157 所示。

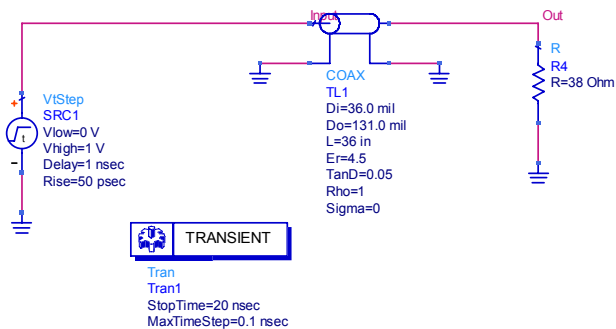


图 4-156 信号的损耗原理图

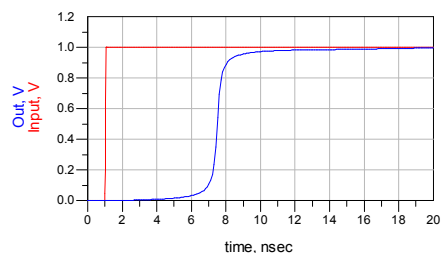


图 4-157 有损耗传输线的输入信号和输出信号

### 4.4.2 有损耗传输线的建模

- 模型带宽=2GHz，线时延 0.5ns，物理长度=3in，最小节数 n=10。
- 每节长度=0.3in，因为电感 L 大约=9nH/in，所以每节电感  $L_L=2.7\text{nH}$ 。

- 在低损耗区  $R = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} = 50$ ，得到  $C_L = 1.08 \text{ pF}$ 。

单位长度交流电阻  $R_L = \frac{1 \times 10^{-4}}{w} \sqrt{\omega}$ ， $w=3$ ， $f=100 \text{ MHz}$ ，代入参数得  $R_L = 0.835 \Omega$ ，每节电阻  $= 0.25 \Omega$ 。

- 电导  $G = \omega \tan(\delta) C$ ， $G = 2\pi f \times 0.02 \times 1.08 \times 10^{-12} = 1.36 \times 10^{-5}$ 。

依据以上参数建立的等效电路模型如图 4-158 所示。

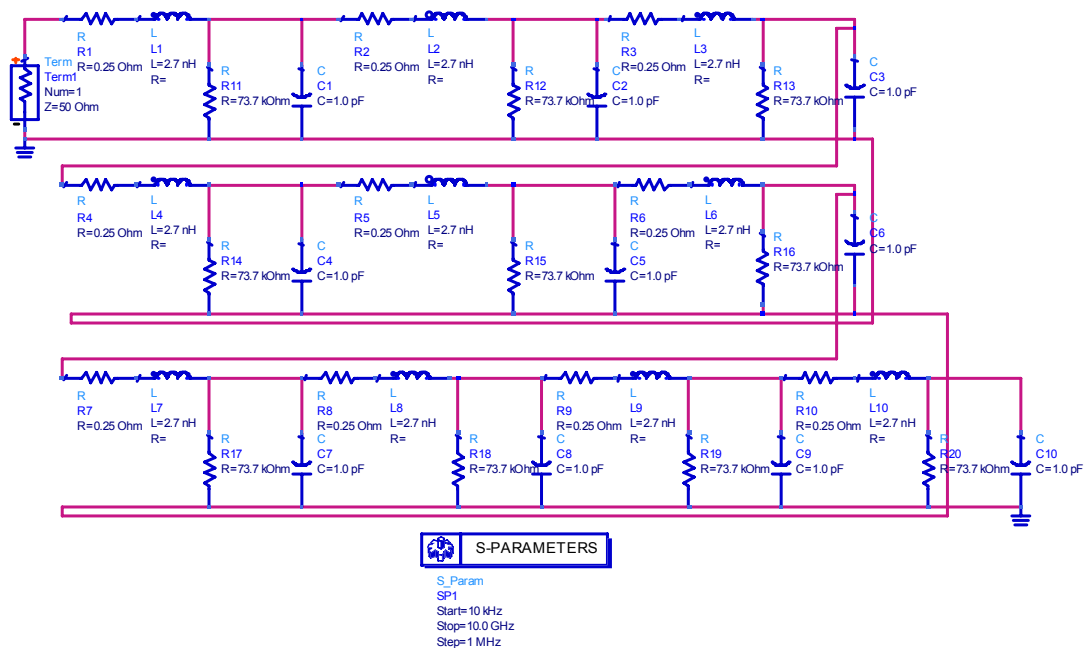


图 4-158 有损耗线的等效电路模型

带宽到 10GHz 的结果如图 4-159 所示。

带宽到 2GHz 的结果如图 4-160 所示。

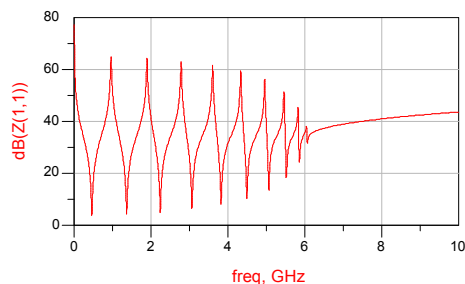


图 4-159 带宽到 10GHz 的结果

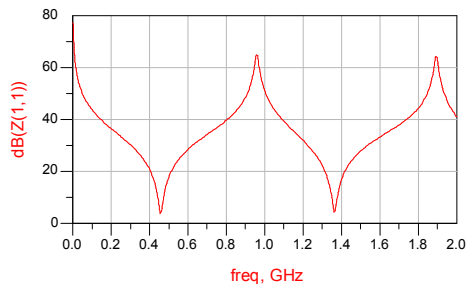


图 4-160 带宽到 2GHz 的结果

#### 4.4.3 传输线测试模型

实际传输线测试结构的原理图如图 4-161 所示。

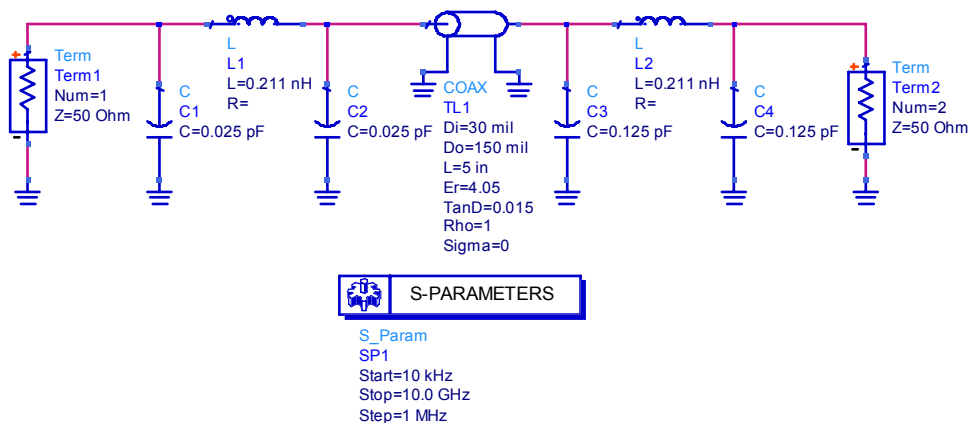


图 4-161 实际传输线测试结构的理想电路模型

仿真得到的插入损耗幅值如图 4-162 所示。

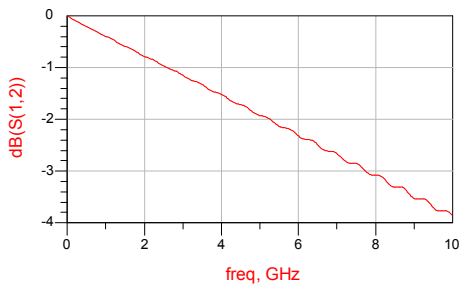


图 4-162 插入损耗幅值

仿真得到的插入损耗相位如图 4-163 所示。

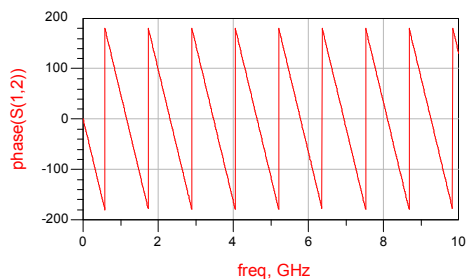


图 4-163 插入损耗相位

## 4.5 传输线的串扰仿真

### 4.5.1 容性耦合电流

只考虑容性耦合时，两条耦合线的等效电路模型。用 ADS 建立的等效电路模型如图 4-164 所示。仿真得到的静态线近端串扰如图 4-165 所示。



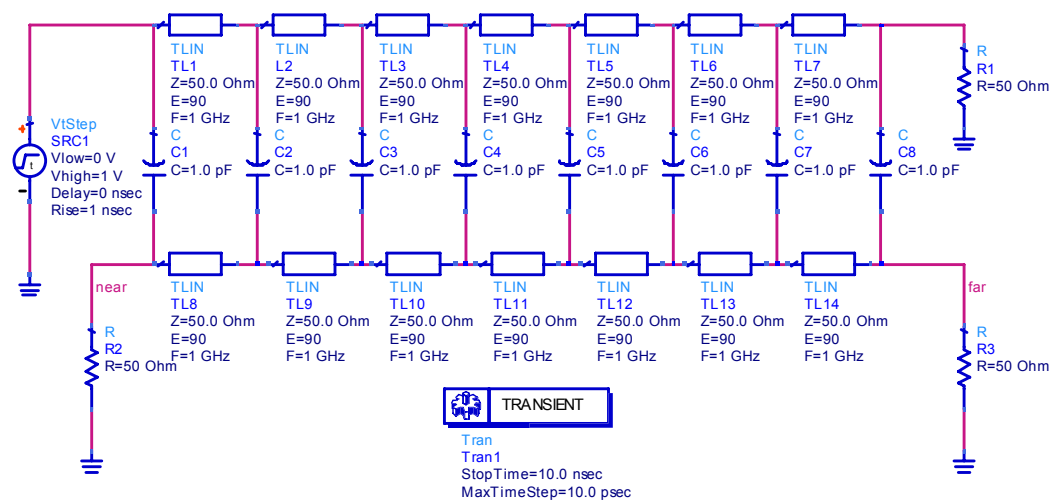


图 4-164 容性耦合等效电路模型

静态线远端串扰如图 4-166 所示。

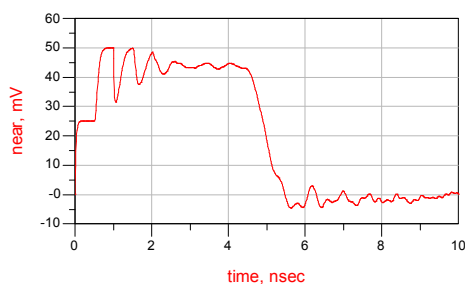


图 4-165 静态线近端串扰

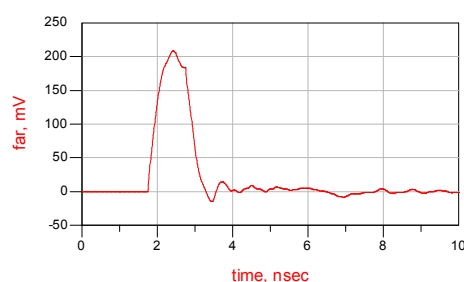
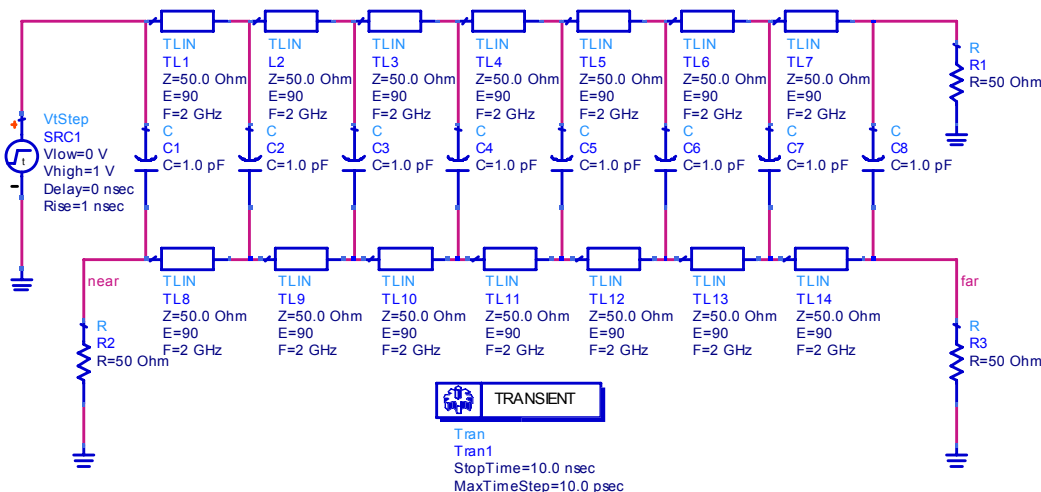


图 4-166 静态线远端串扰

当传输线的频率  $f=2\text{GHz}$  时的等效电路如图 4-167 所示。

图 4-167 传输线的频率  $f=2\text{GHz}$  时的等效电路模型

仿真得到的静态线近端串扰如图 4-168 所示。

静态线远端串扰如图 4-169 所示。

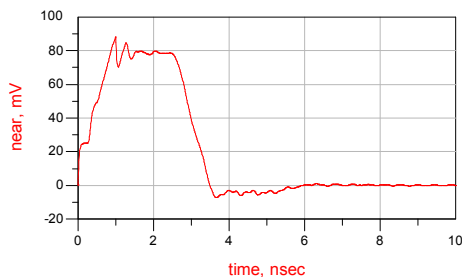


图 4-168 静态线近端串扰

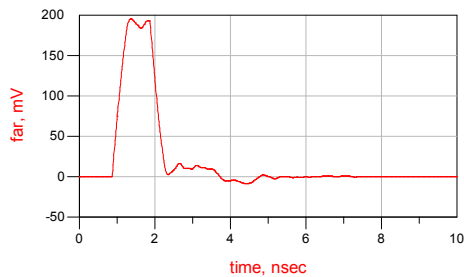


图 4-169 静态线远端串扰

#### 4.5.2 感性耦合电流

只考虑感性耦合，当信号沿着动态线传输时，感应的电流回路分别沿前向和后向传播。原理图如图 4-170 所示。

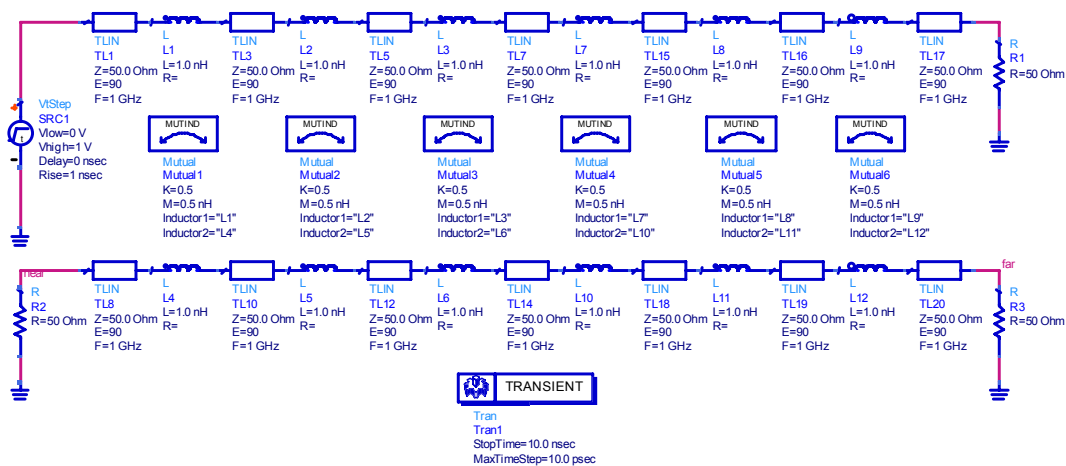


图 4-170 感性耦合电路模型

在原理图中注意参数设置：互感值要小于任何一个自感值，互感单位要选择与自感单位一致。仿真得到的近端串扰如图 4-171 所示。

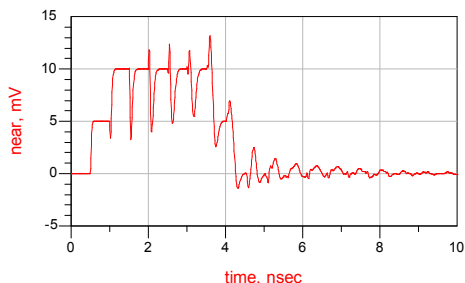


图 4-171 近端串扰

远端串扰如图 4-172 所示。

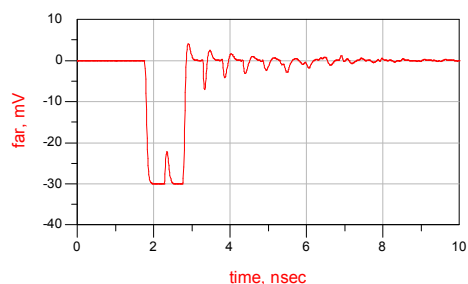
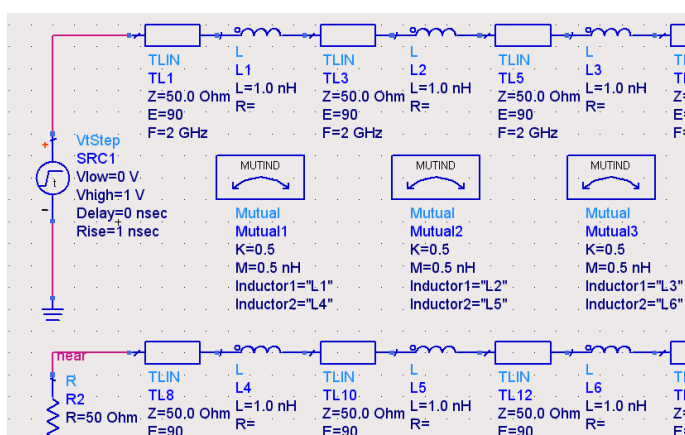


图 4-172 远端串扰

当传输线的频率  $f=2\text{GHz}$  时的等效电路如图 4-173 所示。

图 4-173 传输线的频率  $f=2\text{GHz}$  时的等效电路

近端串扰如图 4-174 所示。

远端串扰如图 4-175 所示。

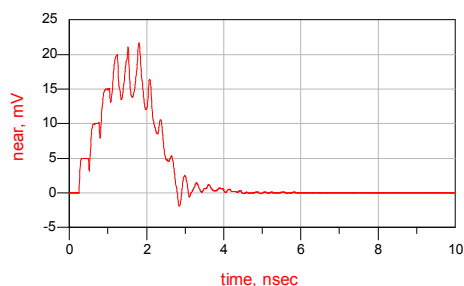


图 4-174 近端串扰

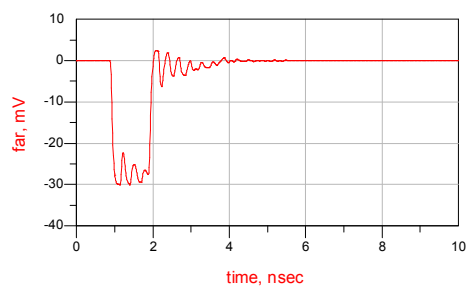


图 4-175 远端串扰

## 4.6 差分对仿真

### 4.6.1 差分对的端接

当差分对末端进行端接和不端接时，仿真差分信号。所建立的等效电路模型如图 4-176 所示。

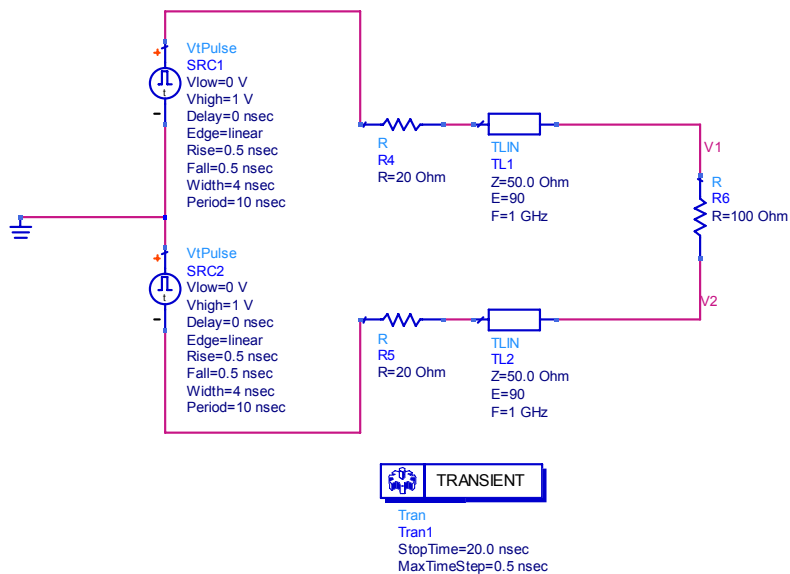


图 4-176 差分对的电路模型

当差分对端接匹配时的结果如图 4-177 所示。

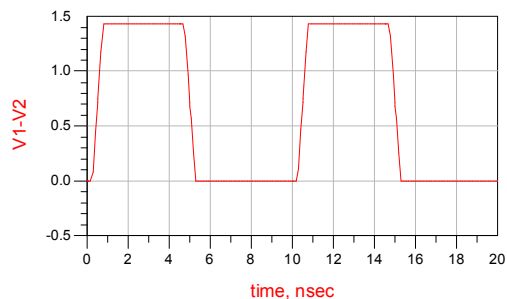


图 4-177 差分对端接时的结果

差分对末端开路时的结果如图 4-178 所示。

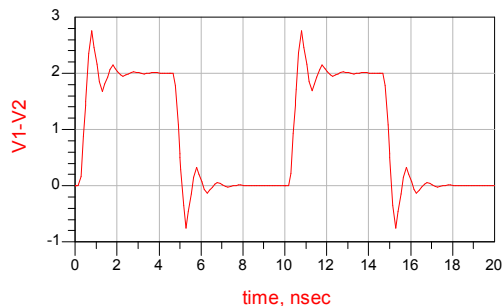
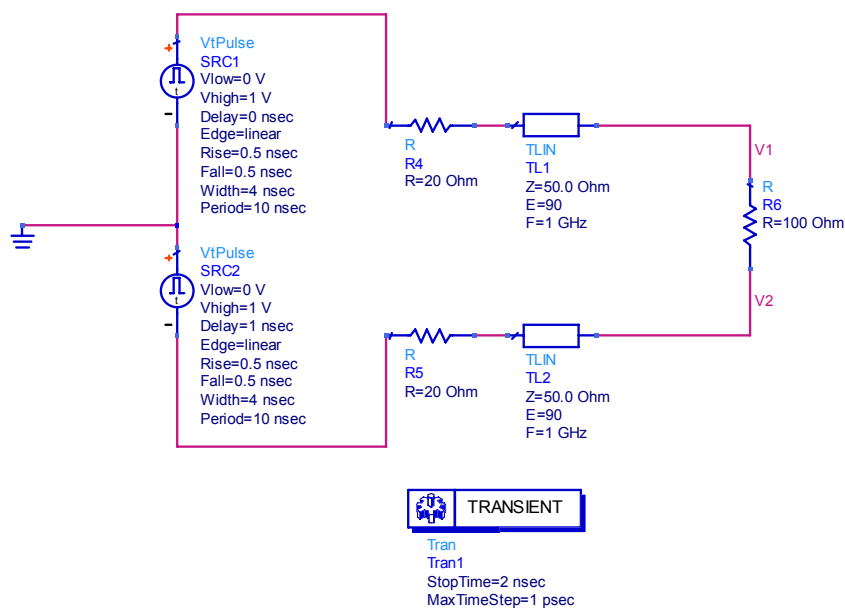


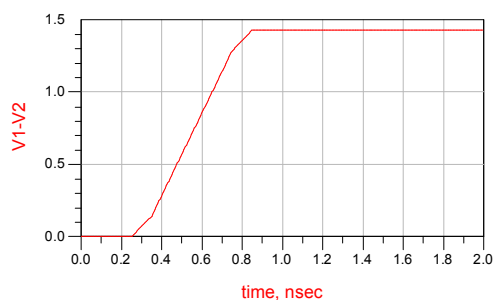
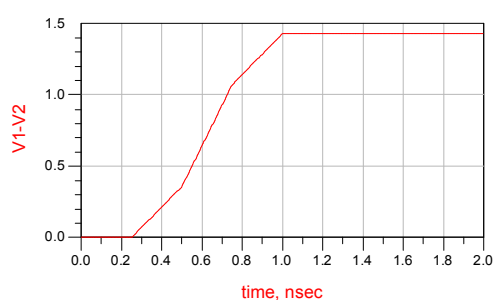
图 4-178 差分对末端开路时的结果

#### 4.6.2 差分信号向共模信号的转化

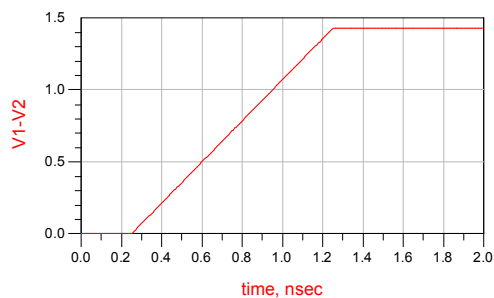
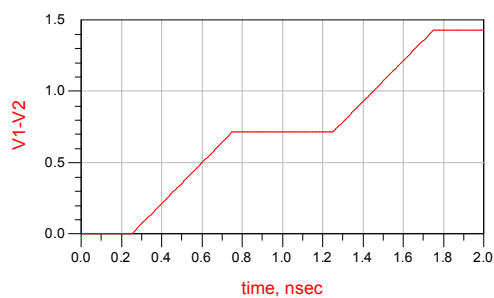
当驱动器错位从上升时间的 20%变化到 2 倍时,差分信号的变化情况。原理图如图 4-179 所示。

图 4-179 差分信号向共模信号的转化原理图 ( $\Delta t=2RT$  时的图)

- (1)  $\Delta t=20\%RT$  的仿真结果如图 4-180 所示。
- (2)  $\Delta t=50\%RT$  的仿真结果如图 4-181 所示。

图 4-180  $\Delta t=20\%RT$  的仿真结果图 4-181  $\Delta t=50\%RT$  的仿真结果

- (3)  $\Delta t=RT$  的仿真结果如图 4-182 所示。
- (4)  $\Delta t=2RT$  的仿真结果如图 4-183 所示。

图 4-182  $\Delta t=RT$  的仿真结果图 4-183  $\Delta t=2RT$  的仿真结果

### 4.6.3 差分对一根信号线接容性负载时的情况

当一根信号线由于感受到了测试焊盘而产生一个容性负载时，另一根却没有，差分信号就会失真。本节仿真这种情况。原理图如图 4-184 所示。

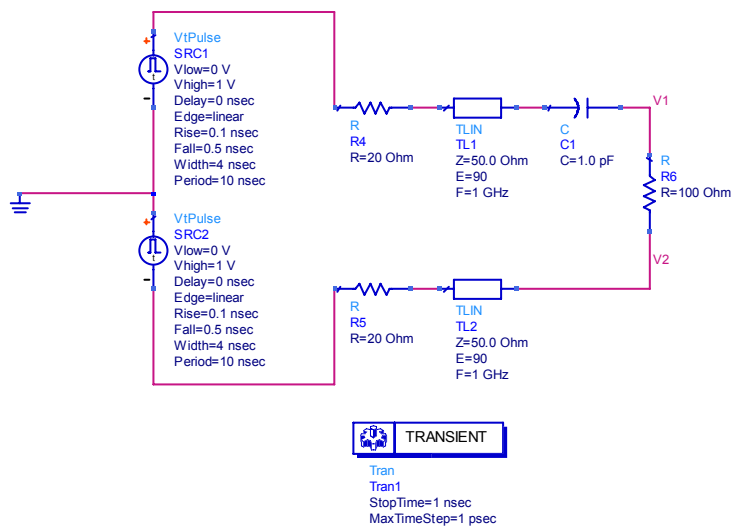


图 4-184 差分对一根信号线接容性负载的原理图

没有接容性负载时的仿真结果如图 4-185 所示。

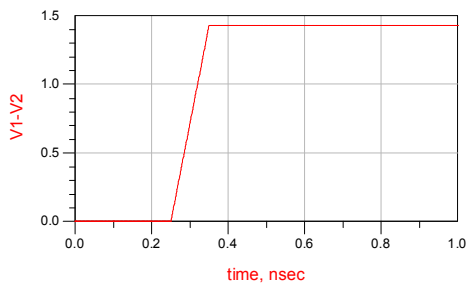


图 4-185 没有接容性负载时的仿真结果

接容性负载时的仿真结果如图 4-186 所示。

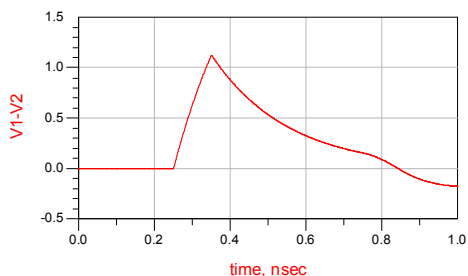


图 4-186 接容性负载时的仿真结果

#### 4.6.4 差分对端接对共模信号的影响

一个小的错位可能不会影响到差分信号，但对共模信号可能产生比较显著的影响。本节仿真这种情况。原理图如图 4-187 所示。

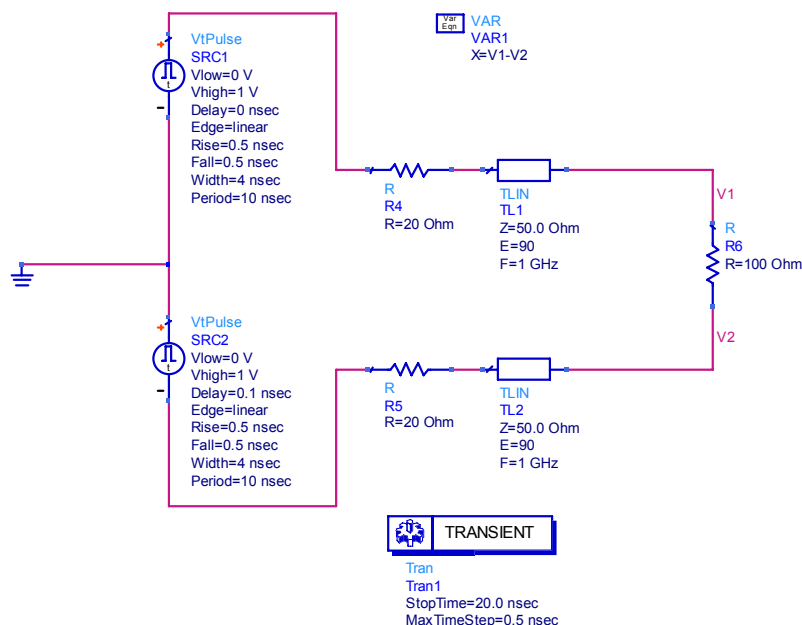


图 4-187 差分对端接对共模信号的影响

在求差分信号时，在 Plot Type 选项卡中单击 Advanced 按钮可以进行曲线的加减运算，如图 4-188 和图 4-189 所示。

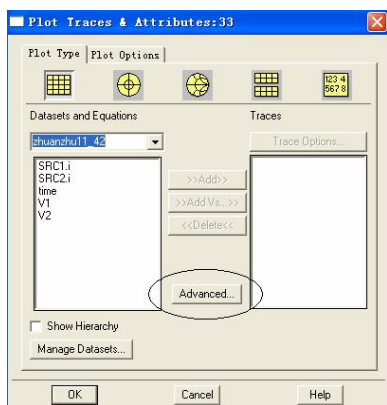


图 4-188 单击 Advanced 按钮

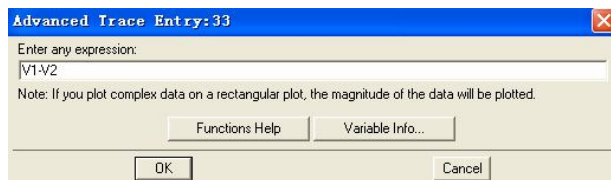


图 4-189 输入 V1-V2

差分信号和共模信号如图 4-190 所示。

#### 4.6.5 同时端接共模和差模

驱动器没有错位，同时端接共模和差模。原理图如图 4-191 所示。在这种情况下，共模消失了。

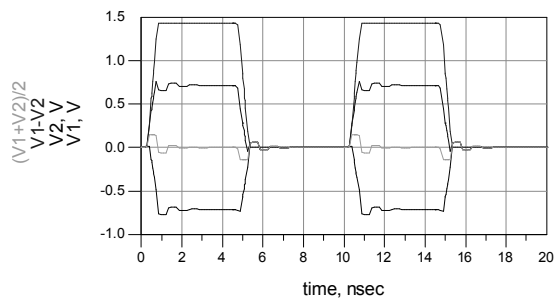


图 4-190 差分信号和共模信号

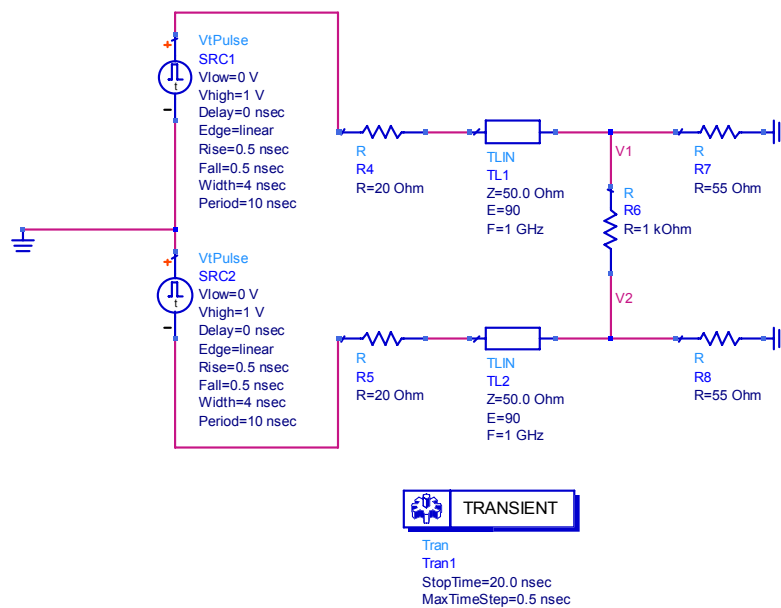


图 4-191 驱动器没有错位，同时端接共模和差模

仿真得到的差分信号和共模信号如图 4-192 所示。

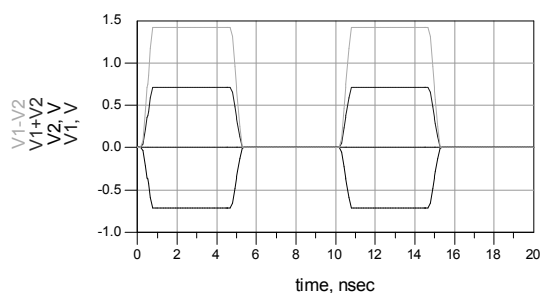


图 4-192 差分信号和共模信号

#### 4.6.6 同时端接共模和差模有错位

同时端接共模和差模，有错位，利用图 4-191，只改变错位，如图 4-193 所示。



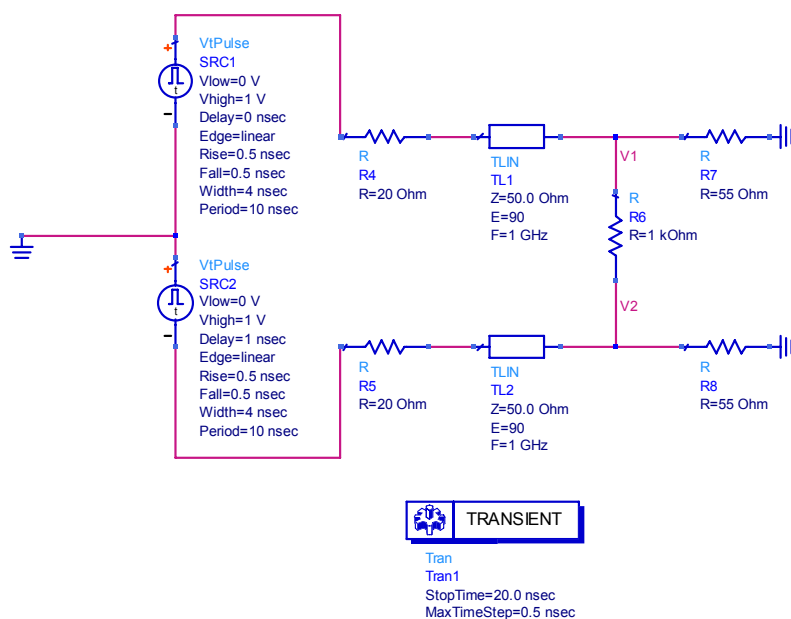


图 4-193 驱动器有错位，同时端接共模和差模

错位=20%RT 的仿真结果如图 4-194 所示。

错位=50%RT 的仿真结果如图 4-195 所示。

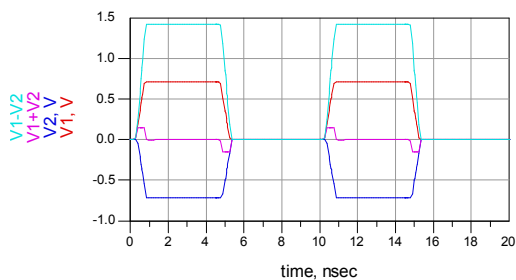


图 4-194 错位=20%RT 的仿真结果

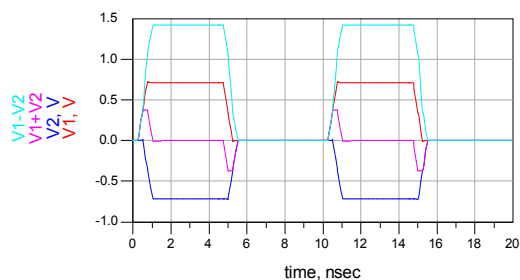


图 4-195 错位=50%RT 的仿真结果

错位=100%RT 的仿真结果如图 4-196 所示。

错位=200%RT 的仿真结果如图 4-197 所示。

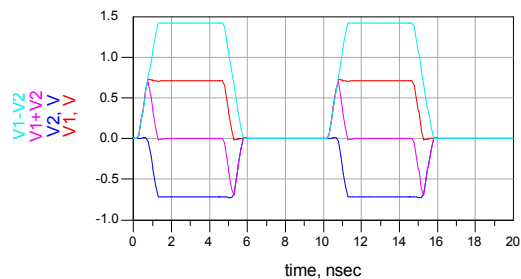


图 4-196 错位=100%RT 的仿真结果

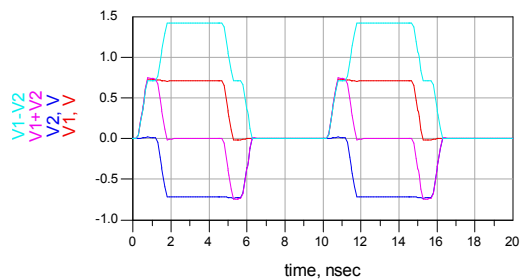


图 4-197 错位=200%RT 的仿真结果