

本章将使用 AD 软件实现对模拟电路的仿真,其内容主要包括直流工作点分析、直流扫描分析、交流小信号分析、瞬态分析、参数扫描分析、傅里叶分析、噪声分析、温度分析和蒙特卡洛分析。

3.1 直流工作点分析

本节将构建用于直流分析的电路,并进行直流工作点分析,主要内容包括构建直流分析电路、设置分析参数和分析仿真结果。

3.1.1 建立新的直流工作点分析工程


首先给出建立直流分析电路工程的步骤,主要包括:

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,在创建工程的窗口中 LOCATIONS (位置)选择 Local Projects, Project Type (工程类型)选择 PCB, Project Name 工程名称为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程,添加名为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.1.2 添加新的仿真库

添加仿真所需要用到的一些仿真库。其步骤主要包括:

(1) 在当前 AD 软件主界面选择 View→Panels→Components 命令,打开如图 3-1 所示的元器件库浏览界面。

(2) 在图 3-1 所示的界面内,右击  按钮选择 File-based Libraries Preferences... 命令,打开如图 3-2 所示的 Available File-based Libraries(可利用的文件库)界面,选择 Installed(已安装)标签。

(3) 单击图 3-2 界面下方的 Install...按钮。

(4) 如图 3-3 所示,打开所要添加库的对话框。

① 将路径指向 C:\users\Public\Documents\Altium\AD23\Library\Simulation。

② 选择 Simulation Sources,并单击“打开”按钮。

(5) 如图 3-4 所示,看到新添加的 Simulation Sources.IntLib 仿真库。

(6) 单击图 3-4 界面内的 Close 按钮,退出该界面。

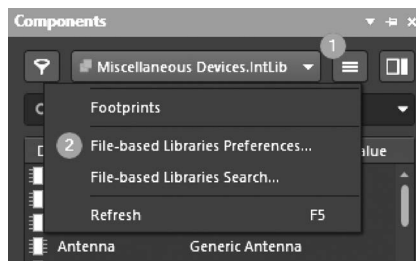


图 3-1 元器件库浏览界面

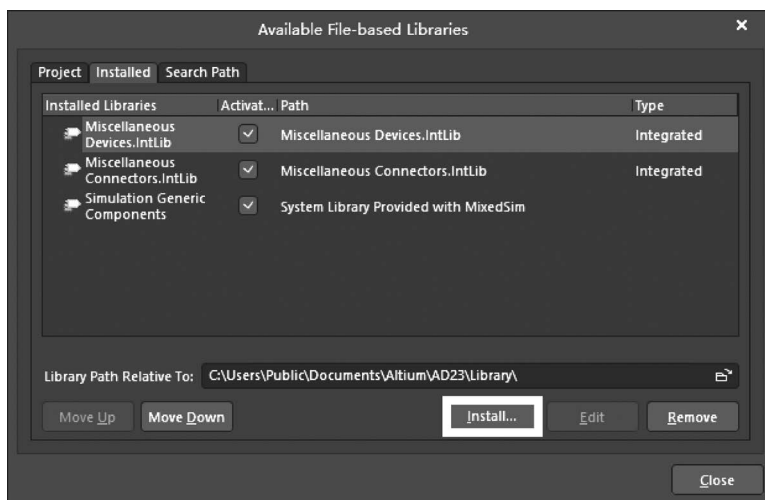


图 3-2 添加文件库浏览界面

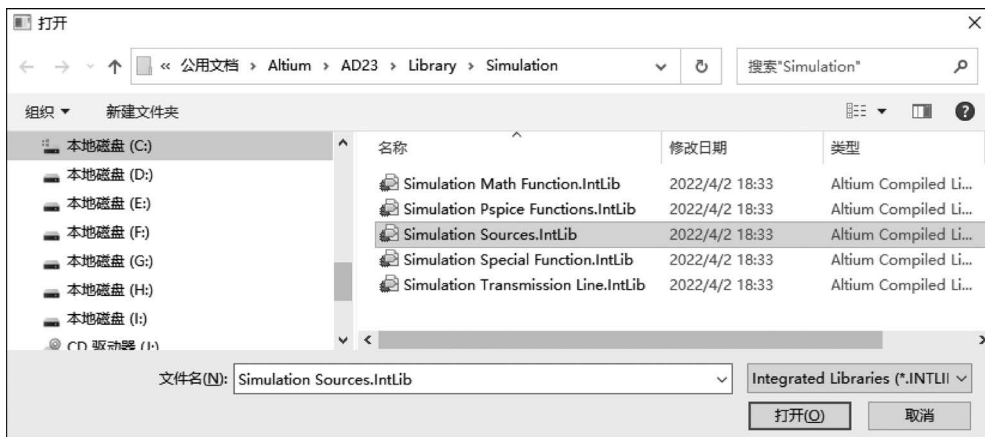


图 3-3 打开所要添加的仿真库对话框

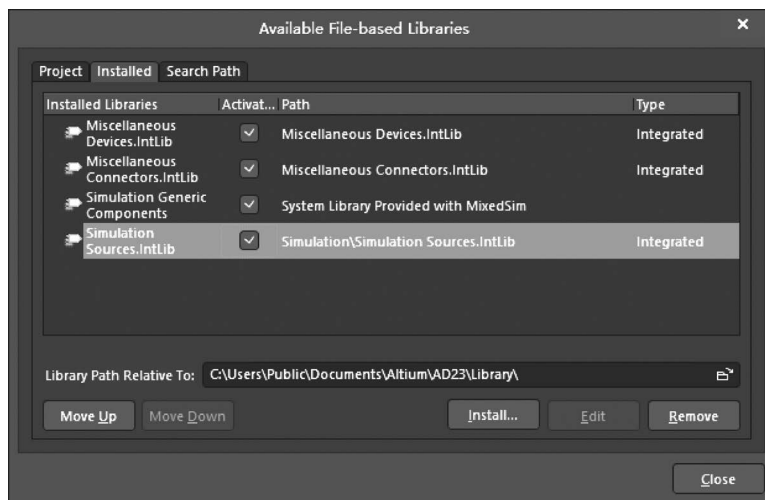



图 3-4 已经添加了需要添加的仿真库

3.1.3 构建直流分析电路

构建直流分析电路,其步骤主要包括:

(1) 从 Miscellaneous Devices, IntLib 库中分别找到名为 Res1 的电阻元器件和名为 Cap Semi 的电容元器件,并将其按照图 3-5 所示的位置进行放置。

(2) 从 Simulation Sources, IntLib 库中找到名为 VSRC 的元器件,并按照图 3-5 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 软件主界面工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-5 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 软件主界面工具栏内的连线按钮,将这些元器件和直流源按照图 3-6 所示的方式进行连接。

(5) 按照前面所介绍的为元器件分配标识符的方法,为电路中的元器件和直流源分配唯一的标号,图 3-6 给出分配完标识符后的原理图界面。

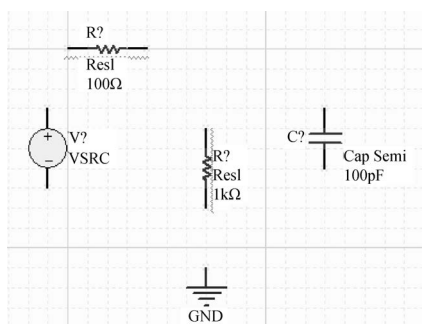


图 3-5 放置找到的仿真元器件到原理图设计界面

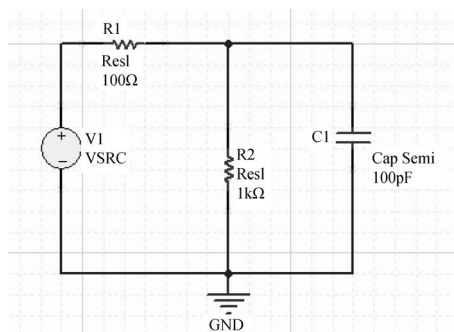


图 3-6 将元器件和直流源连接并分配唯一标识符

(6) 修改 V1、R1 和 C1 的参数设置。下面以修改 V1 的参数为例:

① 双击图 3-6 内的 V1 信号源图标。

② 打开如图 3-7 所示的界面,在 Parameters 下,找到 Value 列,输入 5V。

③ 单击界面中的 OK 按钮,关闭该界面。如图 3-8 所示,修改剩下的电路元器件参数,以满足仿真条件。

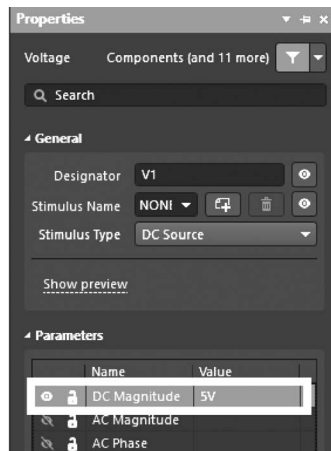


图 3-7 修改 V1 参数

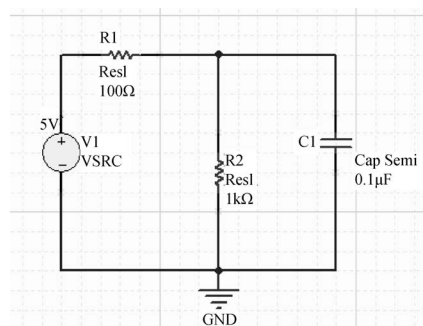


图 3-8 修改完所有的参数

(7) 为了便于分析仿真结果,按照前面的方法,为电路某些节点指定网络标号,如图 3-9 所示。

(8) 保存设计文件,将其保存在 dc_analysis 目录下(读者也可以自己建立一个子目录)。

3.1.4 设置直流工作点分析参数

下面介绍设置直流工作点分析参数的方法。其步骤主要包括:

(1) 在 AD 软件主界面选择 Simulate→Simulation Dashboard (仿真面板)命令。

如果 Simulate 那一栏是空的,则是安装软件时没安装仿真模块。可以通过选择 Help→About→Extension&Updates 命令,在 installed 选项卡中单击 Configure 按钮勾选 Platform Extension 中没选中的选项,再单击 Apply 按钮重启一下即可。

(2) 打开如图 3-10 所示的 Simulation Dashboard 界面。按下面参数设置:

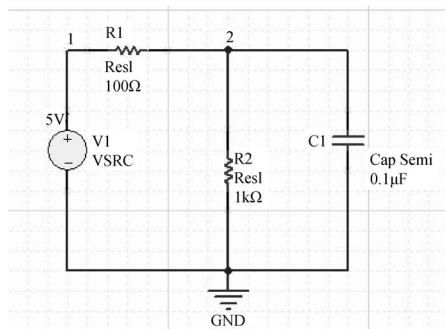


图 3-9 指定电路节点网络标号

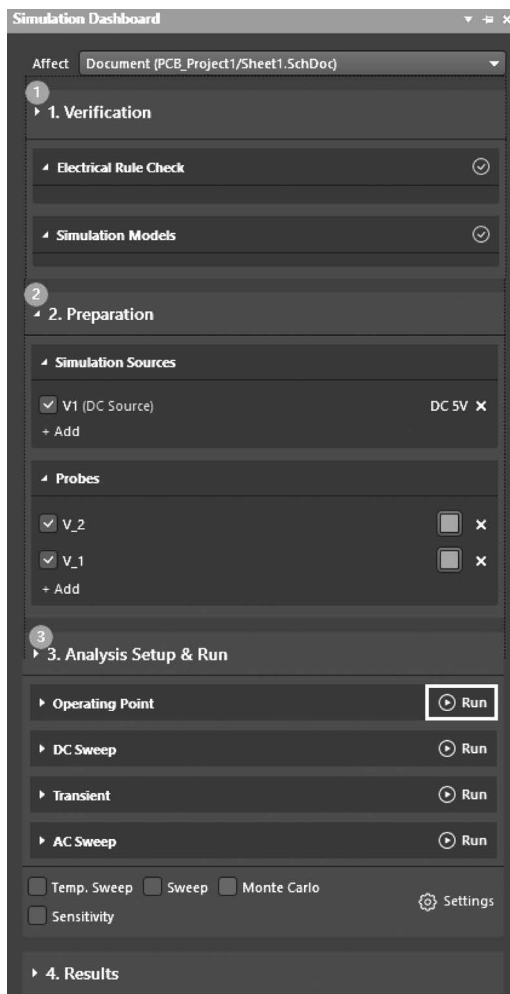


图 3-10 设置直流工作点分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 1 和网络 2 处加入两个 Probes(探针)V_1 和 V_2,用于采集对应网络的静态工作点电压。

③ 在“3. Analysis Setup & Run 中 Operating Point”选项单击 Run 按钮,开始执行仿真。

3.1.5 直流工作点仿真结果分析

对直流工作点仿真的结果进行分析,其步骤主要包括:

(1) 弹出如图 3-11 所示的消息窗口,该消息窗口给出了对 Spice 电路的分析过程。

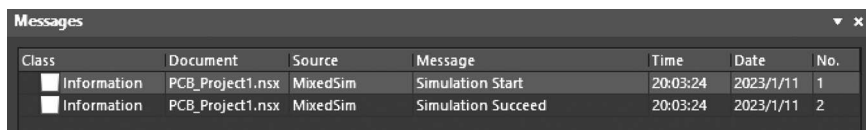


图 3-11 消息窗口

(2) 关闭消息窗口。

(3) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件,图 3-12 给出了对应于两个节点电压的分析结果。



图 3-12 文件中显示 V(1)和 V(2)值

(4) 下面通过 Simulation DashBoard 界面设置,选择 Operating Point 的 Display on schematic 下的 Voltage 和 Current 选项(如图 3-13 所示),在原理图中显示电路中各支路的电压和电流值,如图 3-14 所示。

(5) 如图 3-14 所示,原理图中显示流经电阻的电流为 4.545mA。

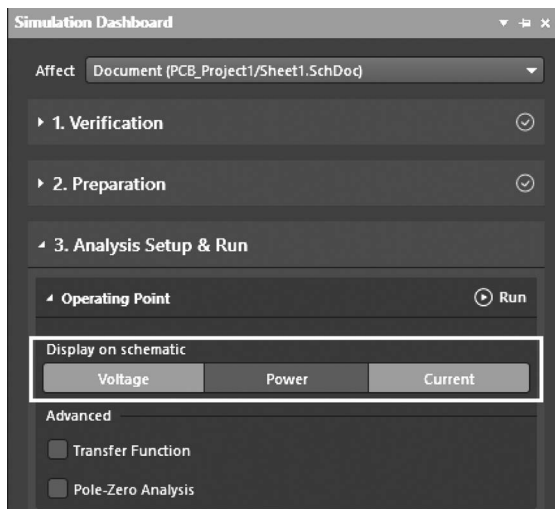


图 3-13 原理图中显示电路静态电压和电流设置

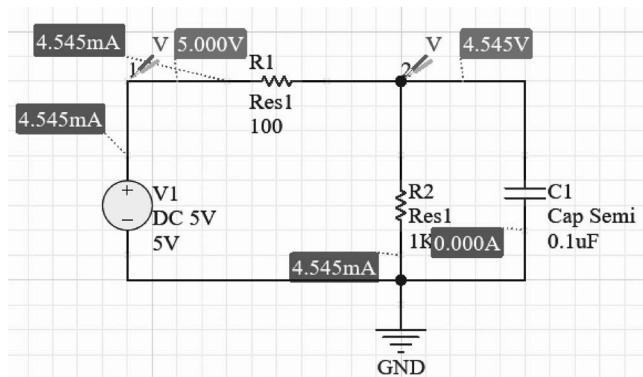


图 3-14 原理图中显示电路静态电压和电流

(6) 将该工程保存到 dc_analysis 目录下,并退出该设计工程,显示 Spice 直流分析程序,如图 3-15 所示。

```

[1] Sheet1.SchDoc PCB_Project1.nsx PCB_Project1.sdf
1 PCB_Project1
- ^SPICE Netlist generated by Advanced Sim server on 2023/1/11 20:25:00
- .options MixedSimGenerated
-
- ^Schematic Netlist:
- CCL 0 2 0.1uF CAP
- RR1 1 2 100
- RR2 0 2 1K
- VV1 1 0 5V
10
- .SAVE allV
- .SAVE allI
- .SAVE allP
-
- .PROBE {V(2)} =PLOT(1) =AXIS(1) =UNITS(V)
- .PROBE {V(1)} =PLOT(1) =AXIS(1) =UNITS(V)
-
- ^Selected Circuit Analyses:
- .OP
20
- ^Models and Subcircuits:
- ^Default semiconductor capacitor
- .MODEL CAP C()
-
- .END

```

图 3-15 Spice 直流分析程序

3.2 直流扫描分析

本节将使用前面设计的电路,实现直流扫描分析,主要内容包括打开前面的分析电路、设置直流扫描参数和分析直流扫描的仿真结果。

3.2.1 打开前面的设计

打开前面设计的步骤主要包括:

- (1) 新建一个 dc_sweep_analysis 文件夹,把 dc_analysis 文件夹下的所有文件复制到 dc_sweep_analysis 文件夹下。
- (2) 在 AD 软件中,打开 dc_sweep_analysis 文件夹下的工程文件。

3.2.2 设置直流扫描分析参数

下面介绍设置直流扫描分析参数的方法。其步骤主要包括:

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation DashBoard 命令。
- (2) 打开如图 3-16 所示的 Simulation DashBoard 界面,按下面参数设置:
 - ① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。
 - ② 在“2. Preparation”中 Probes 界面中保留探针 V_1 和 V_2,用于采集对应网络的电压。
 - ③ 在“3. Analysis Setup & Run 中 DC Sweep”选项设置直流扫描电压源为 V1,起始电压(From)为 0V,停止电压(To)为 10V,步进电压(Step)为 1V。
- (3) 单击 DC Sweep 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.2.3 直流扫描仿真结果分析

介绍通过图形观察直流扫描仿真结果的方法。其步骤主要包括:

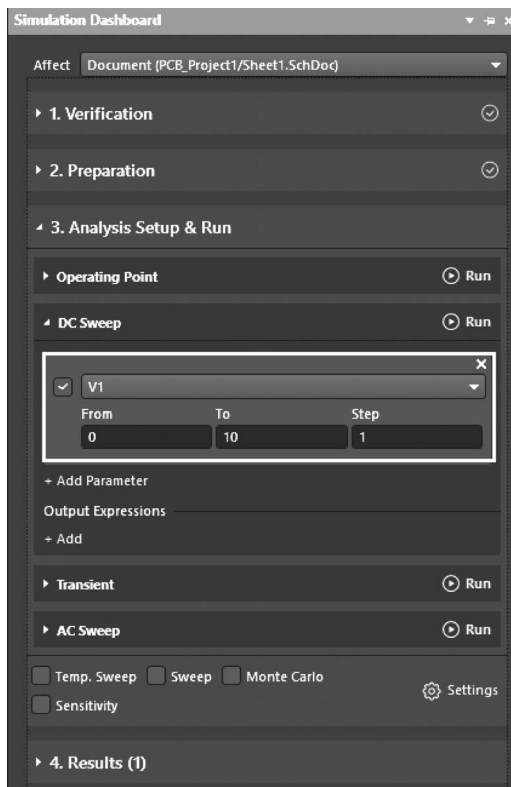


图 3-16 设置直流扫描分析参数

- (1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。
- (2) 自动打开 PCB_Project1.sdf 文件。如图 3-17 所示为网络 V1 和 V2 的 DC Sweep 仿真结果显示。

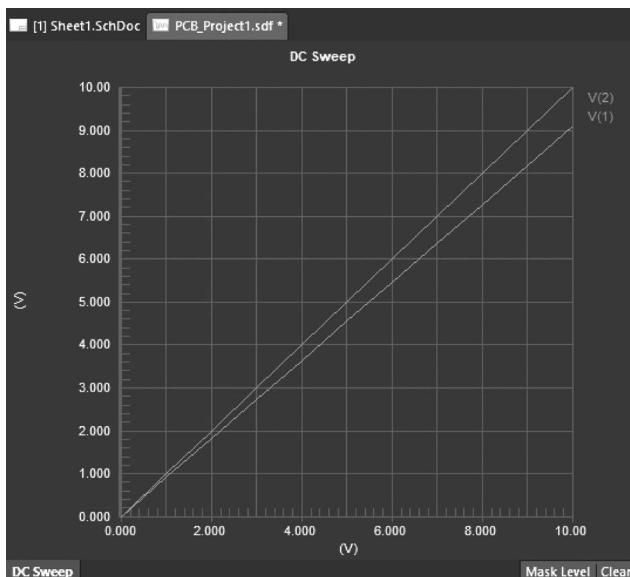


图 3-17 DC Sweep 仿真结果显示

- (3) 保存设计工程,并关闭。

3.3 瞬态分析

本节将构建用于瞬态分析的电路,并执行瞬态分析,主要包括构建瞬态分析电路、设置瞬态分析参数和分析瞬态仿真的结果。

3.3.1 建立新的瞬态分析工程

建立瞬态分析电路工程的步骤主要包括:

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,创建一个名为 PCB_Project1. PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名称为 Sheet1. SchDoc 的原理图文件。

3.3.2 构建瞬态分析电路

构建用于瞬态分析的电路,并执行瞬态分析。其步骤主要包括:

- (1) 从 Miscellaneous Devices. IntLib 库中分别找到名为 Res1 的电阻元器件、名为 Cap 的电容元器件、名为 Op Amp 的运算放大器,并将其按照图 3-18 所示的位置分别进行放置。

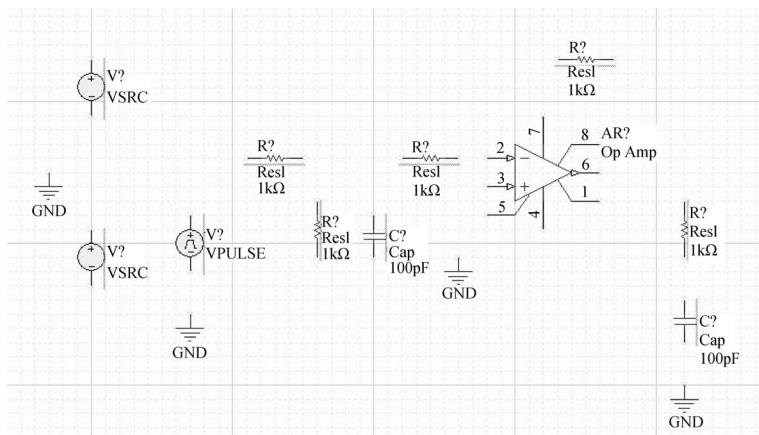




图 3-18 放置元器件和信号源

- (2) 从 Simulation Sources. IntLib 库中找到名为 VSRC 和 VPULSE 的元器件,并按照图 3-18 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-18 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将这些元器件和信号源按照图 3-19 所示的方式进行连接。

(5) 按照前面所介绍的给元器件分配标识符的方法,为电路中的元器件和信号源分配唯一的标识符。图 3-20 给出分配完标识符后的原理图界面。

(6) 在如图 3-21 所示的电路中,按照前面的方法,将 V1 和 V3 的直流电源设置为 +15V。

(7) 为了后面分析仿真结果的方便,按图 3-21 所示的电路,在放大器的输入和输出端分别放置名称为 IN 和 OUT 的网络标号。

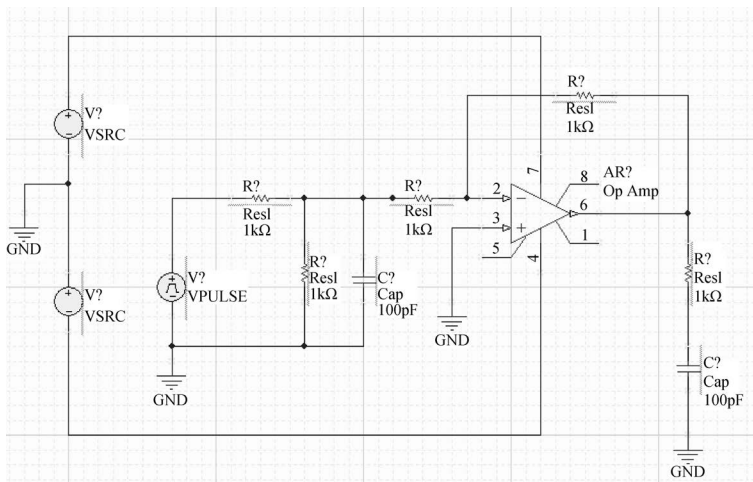


图 3-19 连接电路元件和信号源

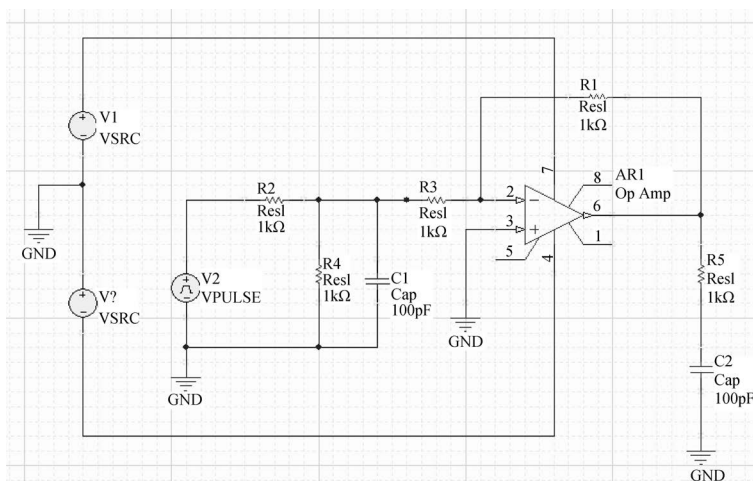


图 3-20 为电路元件和信号源分配唯一的标识符

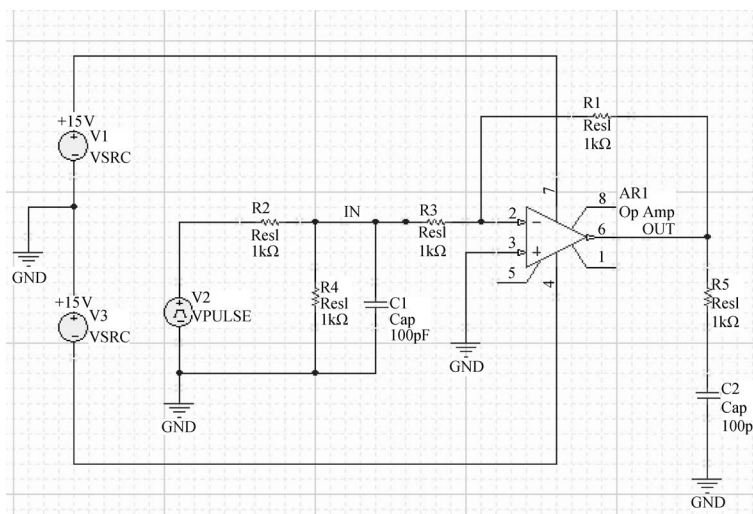


图 3-21 设置电源值并添加 IN 和 OUT 网络标号

(8) 保存文件,将其保存到 transient_analysis 目录下。

3.3.3 设置瞬态分析参数

下面介绍设置瞬态分析参数的方法。其步骤主要包括:

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。
- (2) 打开如图 3-22 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置:

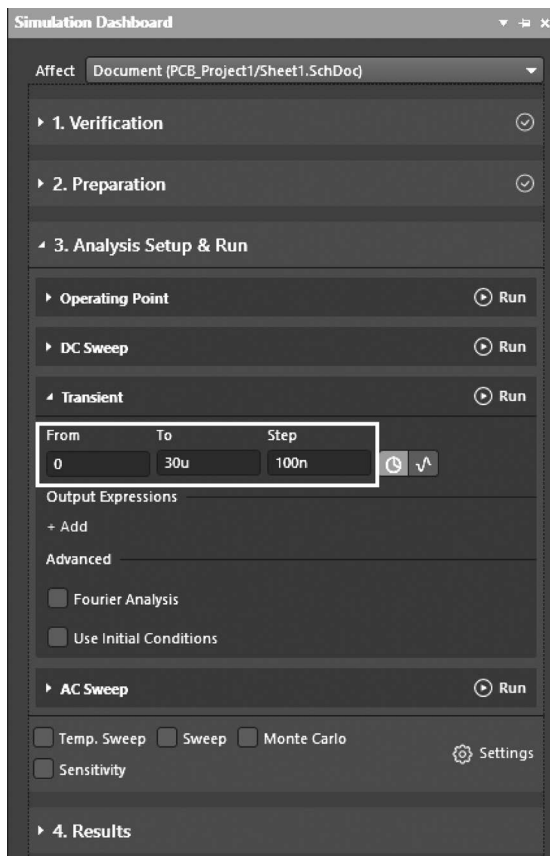


图 3-22 设置瞬态分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 IN 和网络 OUT 处加入两个 Probes(探针)V_IN 和 V_OUT,用于采集对应网络的时域瞬态波形。

③ 在“3. Analysis Setup & Run”中 Transient 选项设置瞬态仿真参数起始时间(From)为 0,停止时间(To)为 $30\mu\text{s}$, (Step)为 100ns 。

(3) 单击 Transient 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.3.4 瞬态仿真结果分析

下面介绍通过图形观察瞬态仿真结果的方法。其步骤主要包括:

- (1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。

(2) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件。显示如图 3-23 所示的图形, V(IN)为输入信号时域瞬态波形、V(OUT)为输出信号时域瞬态波形。

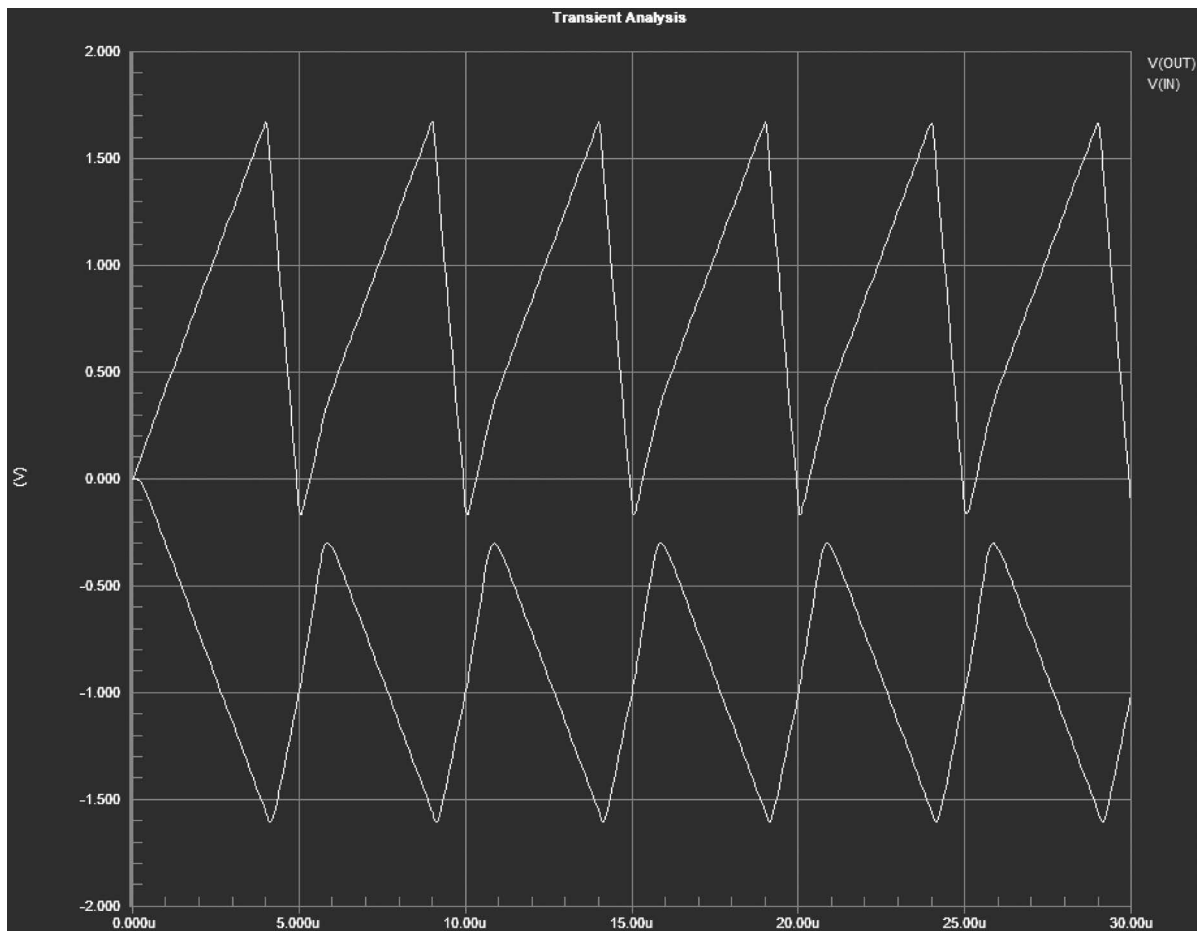


图 3-23 瞬态仿真结果波形(时域瞬态)

(3) 保存设计工程文件,将其保存到 transient_analysis 目录下,并退出该工程。

3.4 傅里叶分析

本节将构建单个 NPN 晶体管放大电路,并在瞬态分析的基础上执行傅里叶分析。主要包括构建傅里叶分析电路、设置傅里叶分析参数和分析傅里叶仿真结果。

3.4.1 建立新的傅里叶分析工程

建立新的傅里叶分析电路工程的步骤主要包括:

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,创建一个名称为 PCB_Project1. PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名称为 Sheet1. SchDoc 的原理图文件。

3.4.2 构建傅里叶分析电路

构建傅里叶分析电路的步骤主要包括：

(1) 从 Miscellaneous Devices. IntLib 库中分别找到名称为 Res1 的电阻元器件、名称为 Cap 的电容元器件、名称为 NPN 的晶体管(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将其按照图 3-24 所示的位置进行放置。

(2) 从 Simulation Sources. IntLib 库中找到名称为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按照图 3-24 所示的位置进行放置。

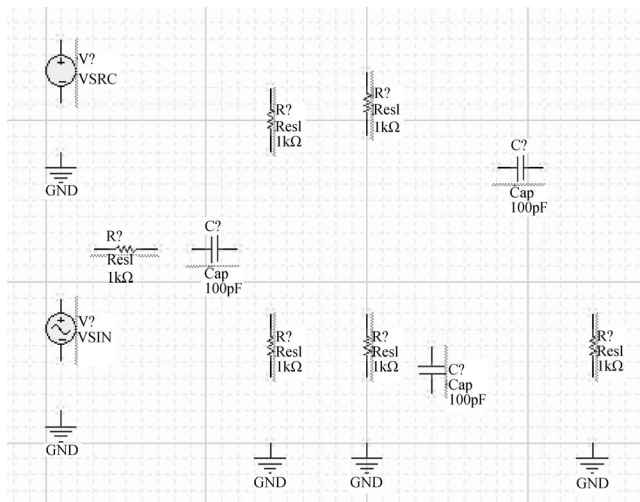



图 3-24 放置元器件和信号源

(3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-24 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的连线按钮,将这些元器件和信号源按照图 3-25 所示的方式进行连接。

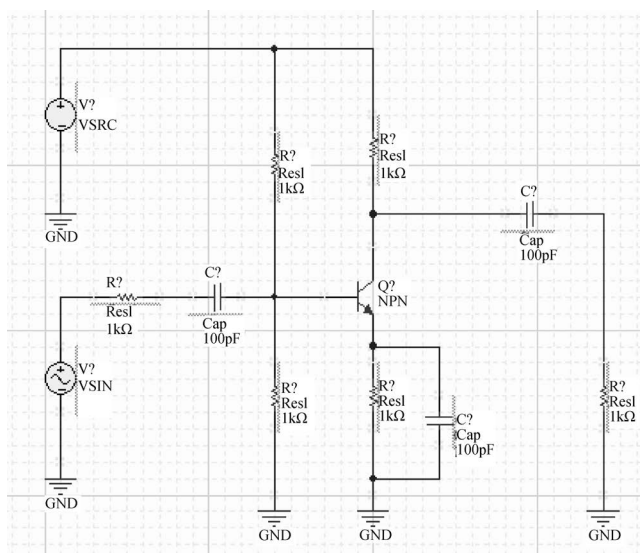


图 3-25 连接电路元器件和信号源

(5) 按照前面所介绍的给元器件分配标识符的方法,为电路中的元器件和信号源分配唯一的标识符。图 3-26 给出分配完标识符后的原理图界面。

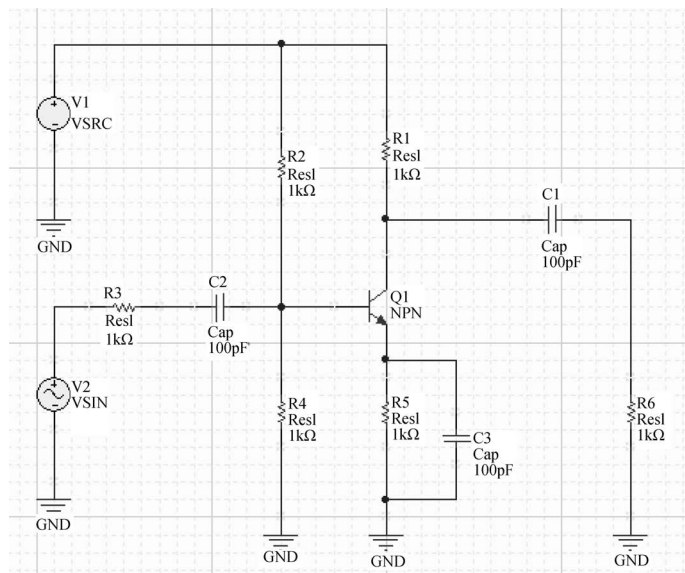


图 3-26 为电路元器件和信号源分配唯一的标识符并设置电源参数

(6) 在如图 3-26 所示的电路中,按照前面的方法,将 V1 直流电源设置为 +12V。如图 3-27 所示,设置 V2 信号源,其参数设置为:

- ① Amplitude: 0.01。
- ② Frequency: 10K。

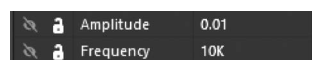


图 3-27 为 V2 信号源设置参数

(7) 按照图 3-28 所示,将电阻和电容值改成相应的值。

(8) 为了观察方便,如图 3-28 所示,在放大器的输入和输出端分别放置名称为 IN 和 OUT 的网络标号。

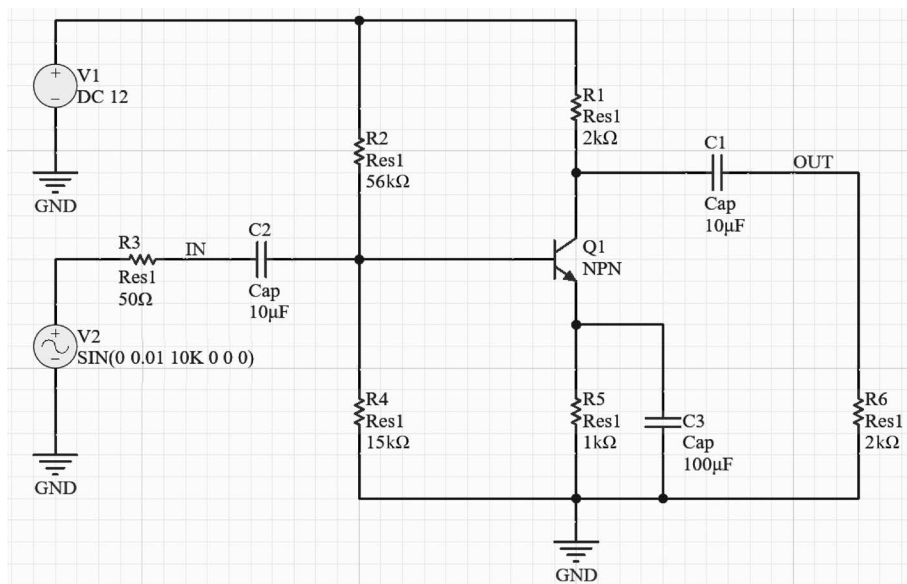


图 3-28 放置网络标号

(9) 保存设计,将其保存到 fourier_analysis 目录下。

3.4.3 设置傅里叶分析参数

下面介绍设置傅里叶分析参数的方法。其步骤主要包括:

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。
- (2) 打开如图 3-29 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置:



图 3-29 设置傅里叶分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 IN 和网络 OUT 处加入两个 Probes(探针)V_IN 和 V_OUT,用于采集对应网络的时域瞬态波形。

③ 在“3. Analysis Setup & Run”中 Transient 选项设置瞬态仿真参数起始时间(From)为 0,停止时间(To)为 $500\mu\text{s}$,步进(Step)为 $2\mu\text{s}$,在 Advanced 部分选中 Fourier Analysis,参数使用默认设置即可。

(3) 单击 Transient 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.4.4 傅里叶仿真结果分析

下面对傅里叶仿真结果进行分析。其步骤主要包括:

- (1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。

(2) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件,在该文件下有两个标签: Transient Analysis 和 Fourier Analysis,单击 Fourier Analysis 标签,如图 3-30 所示。

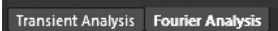


图 3-30 单击 Fourier Analysis 标签

(3) 看到如图 3-31 所示的傅里叶分析的结果。

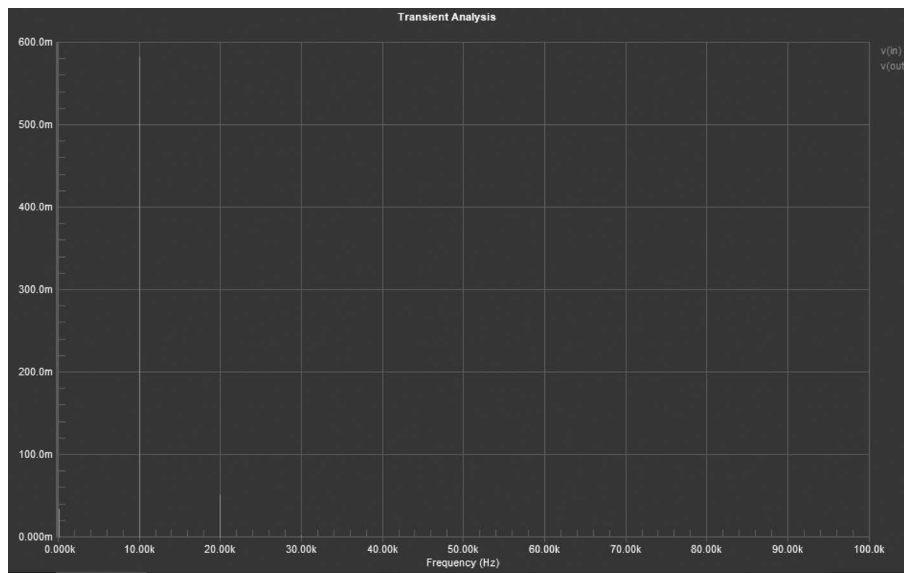


图 3-31 傅里叶分析结果

(4) 单击 Transient Analysis 标签,打开时序分析结果。如果没有出现波形,则按照前面的方法手工将 IN 和 OUT 信号波形添加到该界面中。图 3-32 给出了瞬态分析结果。

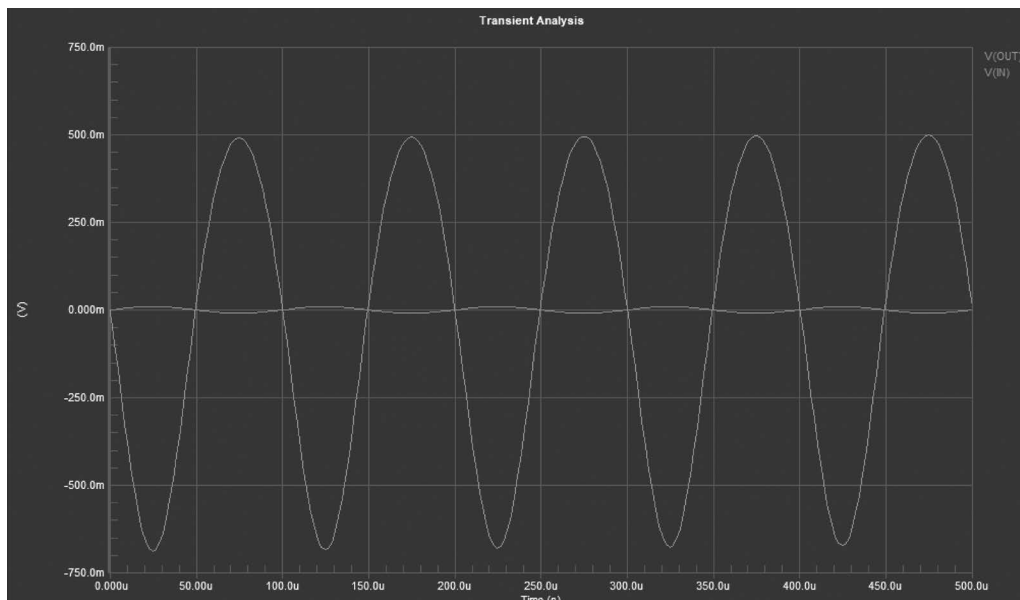


图 3-32 瞬态分析结果

3.4.5 修改电路参数重新执行傅里叶分析

修改电路参数并重新执行傅里叶分析的步骤主要包括：

- (1) 将图 3-28 中的 R4 的值改成 $56\text{k}\Omega$ ，重新执行傅里叶分析。
- (2) 看到如图 3-33 所示的傅里叶分析的结果，很明显发生失真。

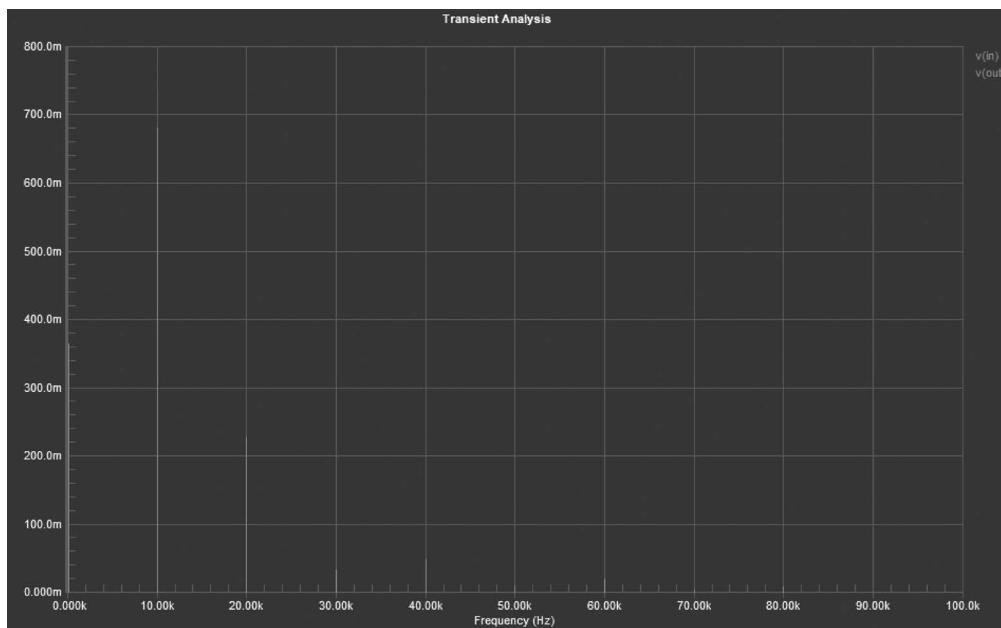


图 3-33 傅里叶分析结果

- (3) 图 3-34 给出了瞬态分析结果。

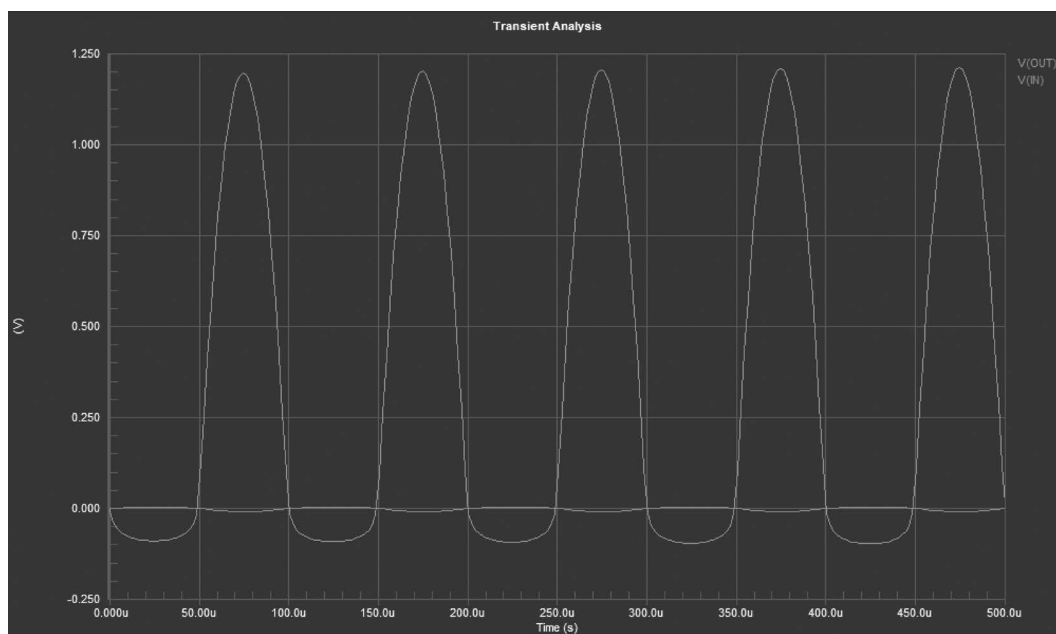


图 3-34 瞬态分析结果

(4) 保存工程文件,将其保存 `fourier_analysis` 目录下(也可以根据情况保存到其他目录下),并且退出该设计工程。

3.5 交流小信号分析

本节将构建用于交流小信号分析的电路,并执行交流小信号分析,主要包括构建交流小信号电路、设置交流小信号分析参数和分析交流小信号的仿真结果。


3.5.1 建立新的交流小信号分析工程

首先建立交流小信号分析电路工程,其步骤主要包括:

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 `File`→`New`→`Project` 命令,创建一个名为 `PCB_Project1.PrjPCB` 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名称为 `Sheet1.SchDoc` 的原理图文件。

3.5.2 构建交流小信号分析电路

下面构建交流小信号分析电路。其步骤主要包括:

- (1) 从 `Miscellaneous Devices.IntLib` 库中分别找到名称为 `Res1` 的电阻元器件、名称为 `Cap` 的电容元器件、名称为 `Diode 1N4001` 的二极管,并将这些元器件按照图 3-35 所示的位置进行放置。
- (2) 从 `Simulation Sources.IntLib` 库中找到名称为 `VSRC` 和 `VSIN` 的元器件,并按照图 3-35 所示的位置进行放置。
- (3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将 `GND` 按照图 3-35 所示的位置进行放置。
- (4) 单击 AD 软件主界面下的工具栏内的连线按钮,将这些元器件和信号源按照图 3-36 所示的方式进行连接。

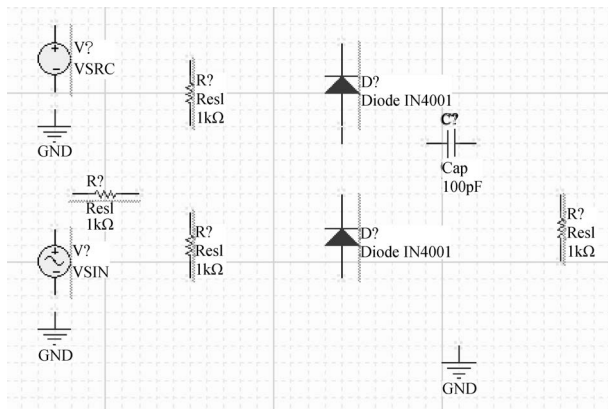


图 3-35 放置元器件和信号源

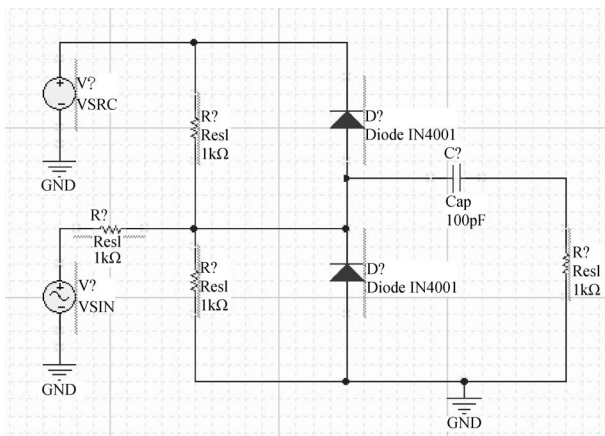


图 3-36 连接电路中的所有元器件和信号源

(5) 按照给元器件分配标识符的方法,为电路中的元器件和信号源分配唯一的标识符。图 3-37 给出了分配完标识符后的原理图界面。

(6) 按照图 3-38 所示,修改电路中元件和信号源的参数设置。为了便于后面对激励源信号的参数修改,下面给出修改 V2 的参数设置步骤。

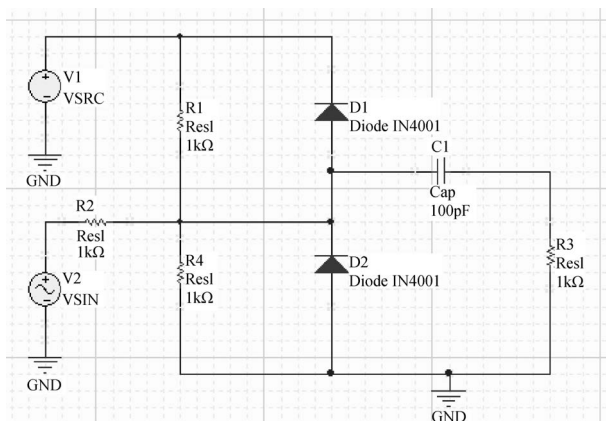


图 3-37 为电路中的元件和信号源分配唯一的标识符

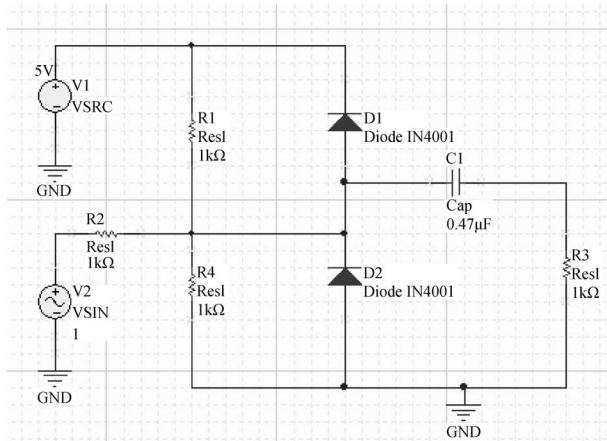


图 3-38 修改后的参数

① 双击 V2 交流信号源符号,打开其配置界面。

② 如图 3-39 所示,单击其配置界面 General 选项卡下方的 Parameters 选项中 AC Magnitude 项,设置交流仿真幅度为 1V。

(7) 为了分析方便,按照图 3-40 所示为电路的一些节点指定网络标识符。

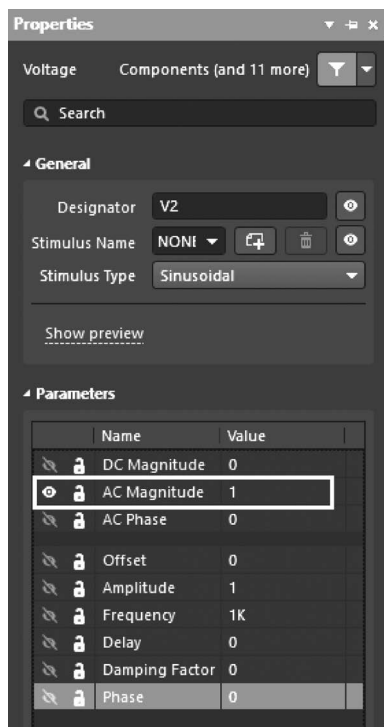


图 3-39 修改信号源配置参数界面

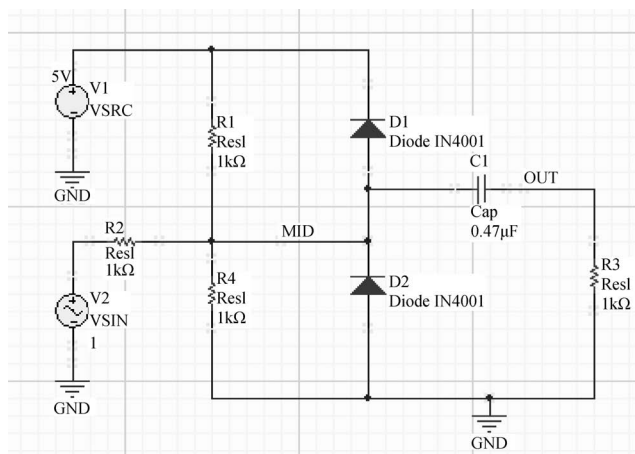


图 3-40 为电路节点指定网络标识符

(8) 保存设计文件,将其保存 ac_analysis 目录下(可根据情况确定保存路径)。

3.5.3 设置交流小信号分析参数

下面介绍设置交流小信号分析参数的方法。其步骤主要包括：

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。
- (2) 打开如图 3-41 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置：

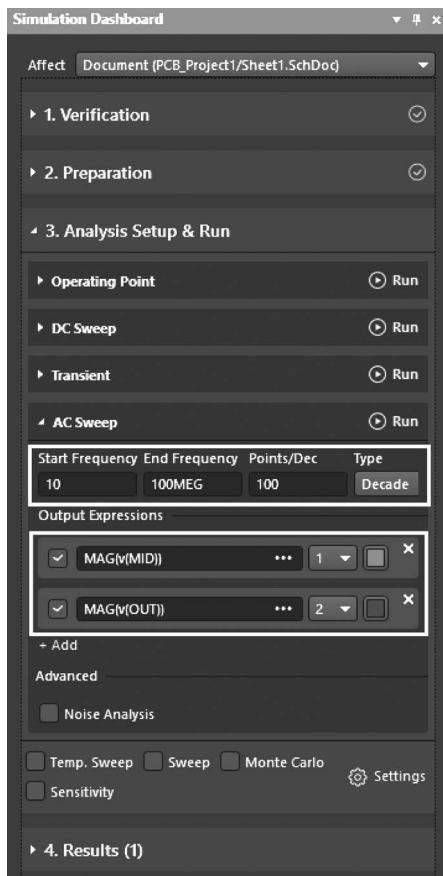


图 3-41 设置交流分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“3. Analysis Setup & Run”中 AC Sweep 选项设置交流分析参数起始频率(Start Frequency)为 10Hz,停止频率(End Frequency)100MHz,点数(Points/Dec)为 100,类型(Type)为 Decade。

③ 在 Output Expressions 界面单击 Add 分别添加 MAG(v(MID))和 MAG(v(OUT))信号作为显示输出。

(3) 单击 AC Sweep 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.5.4 交流小信号仿真结果分析

对交流小信号仿真结果分析的步骤主要包括：

- (1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。
- (2) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件,如图 3-42 所示,可以看到 MID 和 OUT 两个网络节点的交

流小信号分析的结果。

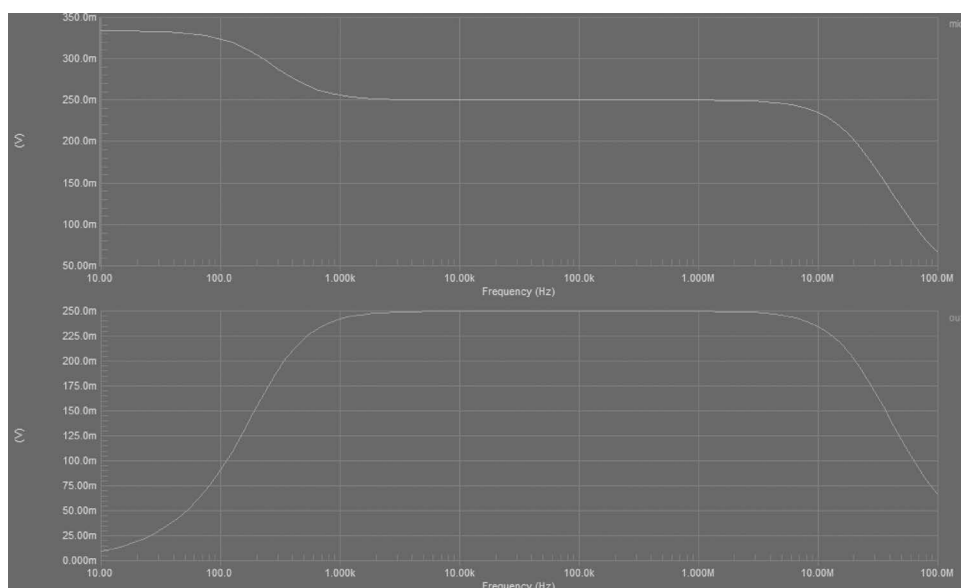


图 3-42 交流小信号仿真结果分析

下面将在图 3-42 中增加 Y 轴,其单位改成 dB。实现该过程的步骤主要包括:

(1) 在图 3-42 所示的界面的 mid 波形图内单击鼠标右键,出现快捷菜单,选择 Add Wave To Plot 选项,出现图 3-43 所示的界面。在该界面内按如下设置:

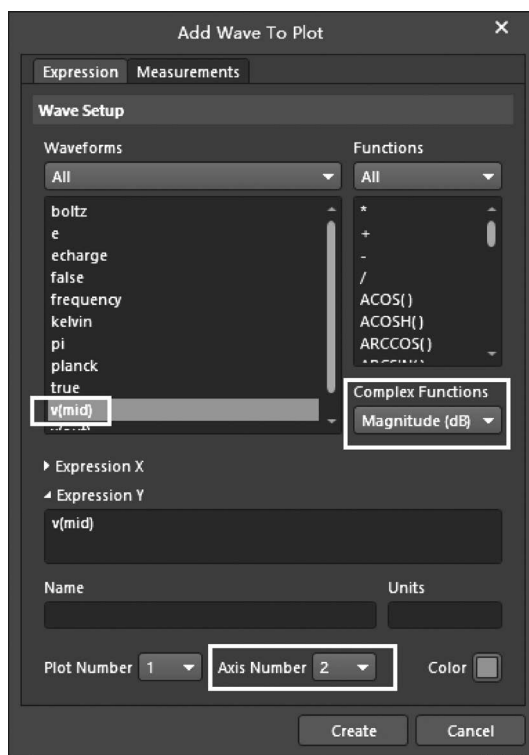


图 3-43 添加波形的选择窗口

- ① 在 Waveforms 窗口下选择 v(mid)。
 - ② 在 Complex Functions 下选择 Magnitude(dB)。
 - ③ 在 AxisNumber 下拉菜单中选择 New axis(添加新的 Y 轴),使用第 2 个 Y 轴显示 dB 单位。
- (2) 单击 Create 按钮。
- (3) 在图 3-44 所示界面的 mid 图形中添加了 Y 轴。

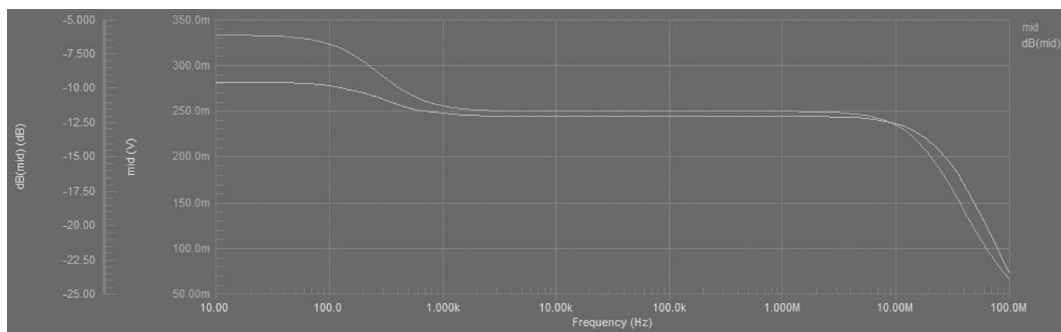


图 3-44 mid 添加的新波形

- (4) 按照前面的方法,为 out 添加波形。图 3-45 给出了 out 添加的新波形。

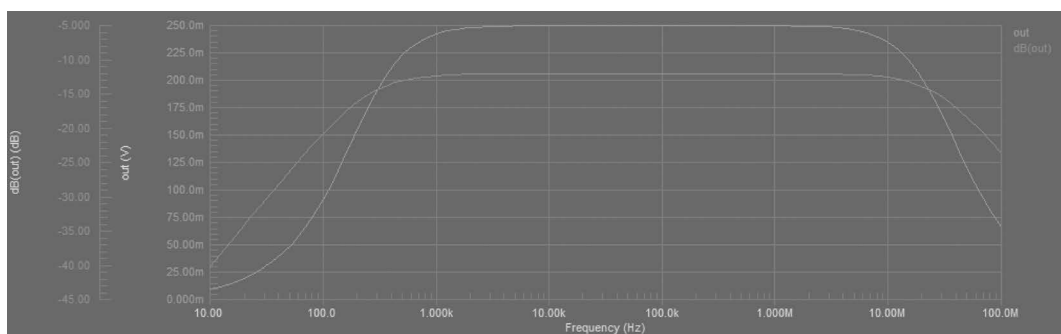


图 3-45 out 添加的新波形

- (5) 保存设计工程和相关文件,将其保存到 ac_analysis 目录下。
- (6) 关闭该设计工程。

3.6 噪声分析

本节将构建用于噪声分析的电路,并执行噪声分析,主要包括构建噪声分析电路、设置噪声分析参数和分析噪声仿真结果。首先对噪声分析中的一些理论知识进行介绍。

输入噪声和输出噪声的定义如下:

1) 输出噪声

输出噪声是指与指定输出网络相关的所有噪声设备噪声的 RMS 值。

2) 输入噪声

输入噪声是一个等效噪声,是指在一个无噪声的理想电路中,在输入源所施加的噪声,用于等效在指定输出网络计算所得到的噪声。表 3-1 是不同元器件所产生的噪声列表。

表 3-1 不同元器件所产生的噪声

| 元器件类型 | 噪声类型(V^2/Hz) | 含 义 |
|------------|------------------|---------------|
| B(GaAsFET) | FID | 闪烁噪声 |
| | RD | 与 RD 相关的热噪声 |
| | RG | 与 RG 相关的热噪声 |
| | RS | 与 RS 相关的热噪声 |
| | SID | 散粒噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| D(二极管) | FID | 闪烁噪声 |
| | RS | 与 RS 相关的热噪声 |
| | SID | 散粒噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| 数字输入 | RHI | 与 RHI 相关的热噪声 |
| | RLO | 与 RLO 相关的热噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| 数字输出 | TOT | 总噪声 |
| J(JFET) | FID | 闪烁噪声 |
| | RD | 与 RD 相关的热噪声 |
| | RG | 与 RG 相关的热噪声 |
| | RS | 与 RS 相关的热噪声 |
| | SID | 散粒噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| M(MOSFET) | FID | 闪烁噪声 |
| | RB | 与 RB 相关的热噪声 |
| | RD | 与 RD 相关的热噪声 |
| | RG | 与 RG 相关的热噪声 |
| | RS | 与 RS 相关的热噪声 |
| | SID | 散粒噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| Q(BJT) | FIB | 闪烁噪声 |
| | RB | 与 RB 相关的热噪声 |
| | RC | 与 RC 相关的热噪声 |
| | RE | 与 RE 相关的热噪声 |
| | SIB | 和基极电流相关的散粒噪声 |
| | SIC | 和集电极电流相关的散粒噪声 |
| | TOT | 总噪声 |
| R(电阻) | TOT | 总噪声 |
| Iswitch | TOT | 总噪声 |
| Vswitch | TOT | 总噪声 |

注:

① 闪烁噪声和 $K_f \cdot (I^{af}/f^b)$ 成正比。② 散粒噪声: 对于 BJT, 和 $2qI$ 成正比; 对于 GaAsFET、JFET 和 MOSFET 来说, 和 $4kT \cdot (dI/dV) \cdot 2/3$ 成正比。③ 热噪声: 和 $4kT/R$ 成正比。

④ 器件总噪声: 是器件内所有噪声的总和。

⑤ NTOT(ONoise): 电路的总输出噪声。

⑥ V(ONoise): 电路总输出噪声的 RMS。

⑦ V(INoise): 等效输入噪声, 由 V(ONoise)/增益得到。

3.6.1 建立新的噪声分析工程

建立新的噪声分析电路工程的步骤主要包括：

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,创建一个名为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.6.2 构建噪声分析电路

构建噪声分析电路步骤主要包括：

- (1) 从 Miscellaneous Devices.IntLib 库中分别找到名称为 Res1 的电阻元器件、名称为 Cap 的电容元器件、名称为 NPN 的晶体管,并将其按照图 3-46 所示的位置进行放置。

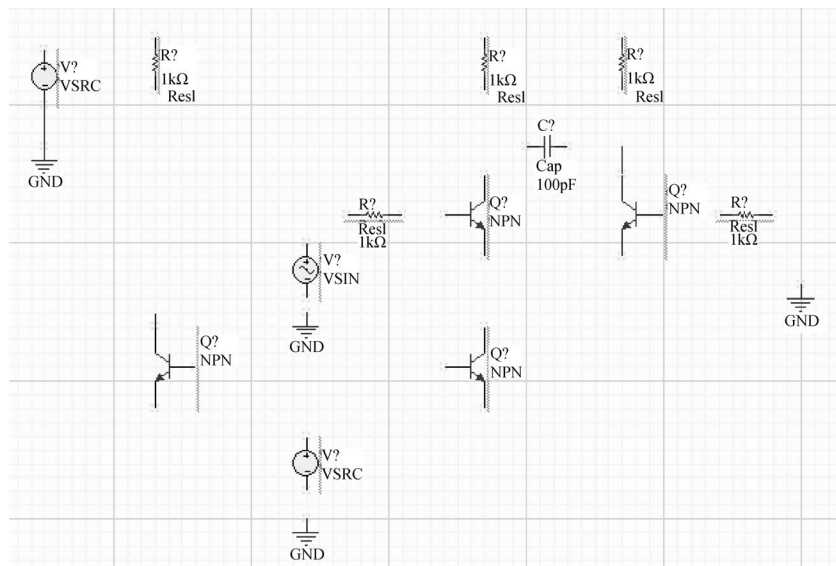


图 3-46 放置仿真元器件和信号源

这里放置多个对称的晶体管,可以镜像放置。方法是：

- ① 双击需要镜像放置的晶体管,打开其配置界面。
- ② 如图 3-47 所示,在该界面下选中 Mirrored 复选框,就可以镜像放置晶体管。

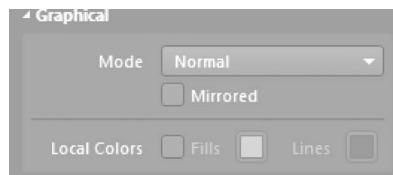




图 3-47 镜像放置晶体管

- (2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名称为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按照图 3-46 所示的位置进行放置。
- (3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-46 所示的位置进行放置。
- (4) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将这些元器件和信号源按照图 3-48 所示的方式进行连接。
- (5) 按照前面所介绍的为元器件分配标识符的方法,为电路中的元器件和信号源分配唯一的标识符。图 3-48 给出分配完标识符后的原理图界面。

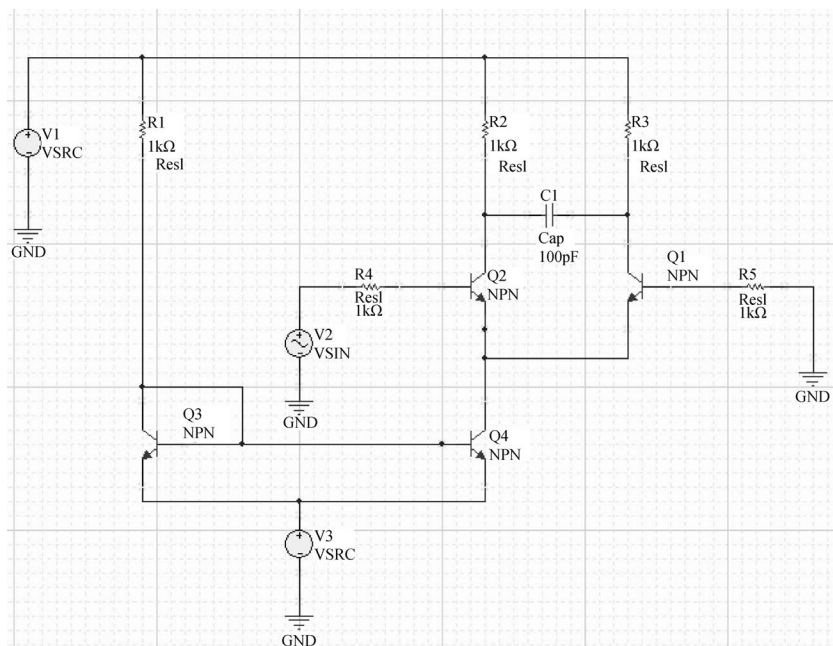


图 3-48 为电路元件和信号源分配唯一的标识符

(6) 如图 3-49 所示,将 V1 和 V3 分别设置为 +12V 和 -12V。其他元器件参数按图 3-49 所示进行设置。

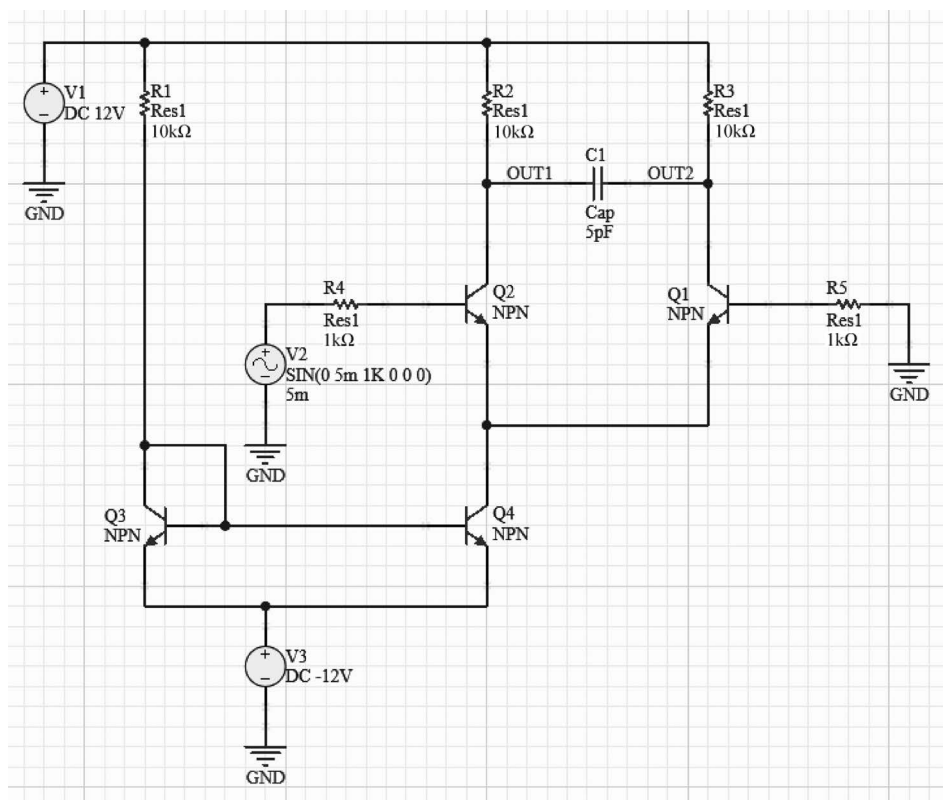


图 3-49 修改电路元件参数并放置网络标号

(7) 为了方便对仿真结果的分析,如图 3-49 所示,在电容 C1 的两端分别放置名称为 OUT1 和 OUT2 的网络标号。

3.6.3 设置噪声分析参数

下面介绍设置噪声分析参数的方法。其步骤主要包括:

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。
- (2) 打开如图 3-50 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置:

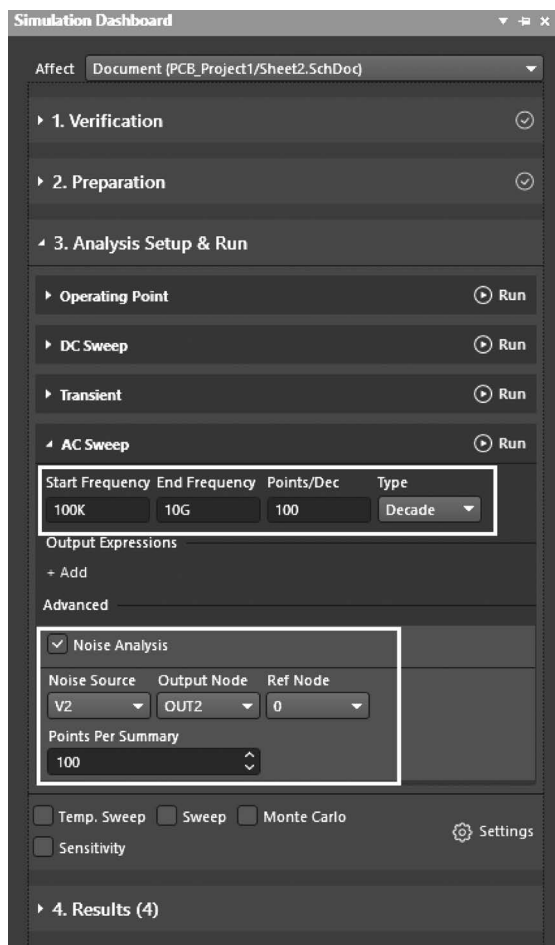


图 3-50 设置噪声分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 OUT2 处加入 Probes(探针) V_OUT2,用于采集对应网络的幅频波形。

③ 在“3. Analysis Setup & Run”中 AC Sweep 选项,设置交流分析参数起始频率(Start Frequency)为 100kHz,停止频率(End Frequency)为 10GHz,点数(Points/Dec)为 100,类型为 Decade,在 Advanced 部分选中 Noise Analysis,参数噪声源(Noise Source)设置为 V2,输出节点(Output Node)设置为 OUT2,参考节点(Ref Node)设置为 0,点数(Points Per Summary)设置为 100。

(3) 单击 AC Sweep 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.6.4 噪声仿真结果分析

下面对噪声仿真结果进行分析。其步骤主要包括:

(1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。

(2) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件。在该文件下,有三个标签:第一个是 AC Analysis(AC 分析);第二个是 Noise Spectral Density(噪声谱密度);第三个是 Intergrated Noise(噪声积分),单击 Noise Spectral Density 标签,如图 3-51 所示。



图 3-51 选择 Noise Spectral Density

(3) 在 Noise Spectral Density 界面需要加入观测的噪声波形信号。单击鼠标右键选择 Add Plot...,在 Plot Wizard 对话框中单击 Next,进入最后一步,单击 Finish 按钮生成一个绘图图表。

(4) 在 Noise Spectral Density 界面单击鼠标右键选择 Add Wave to Plot...,如图 3-52 所示选择 inoise_spectrum 并单击 Create 按钮加入波形,输入噪声谱密度仿真波形如图 3-53 所示。

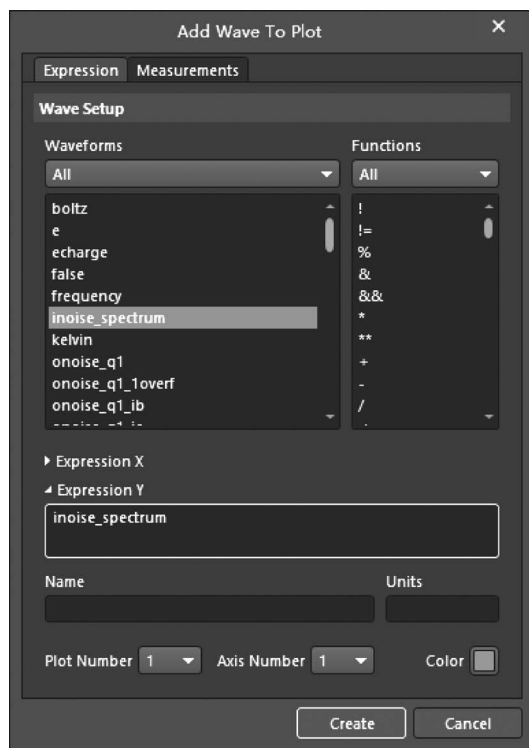


图 3-52 在绘图图标中加入波形

(5) 在 Noise Spectral Density 界面按照上述的步骤创建一个新的绘图图表,并加入 onoise_spectrum,输出噪声谱密度仿真波形如图 3-54 所示。

(6) 保存工程文件,将其保存到 noise_analysis 目录下(可以根据情况保存到其他目录下),退出该设计工程。

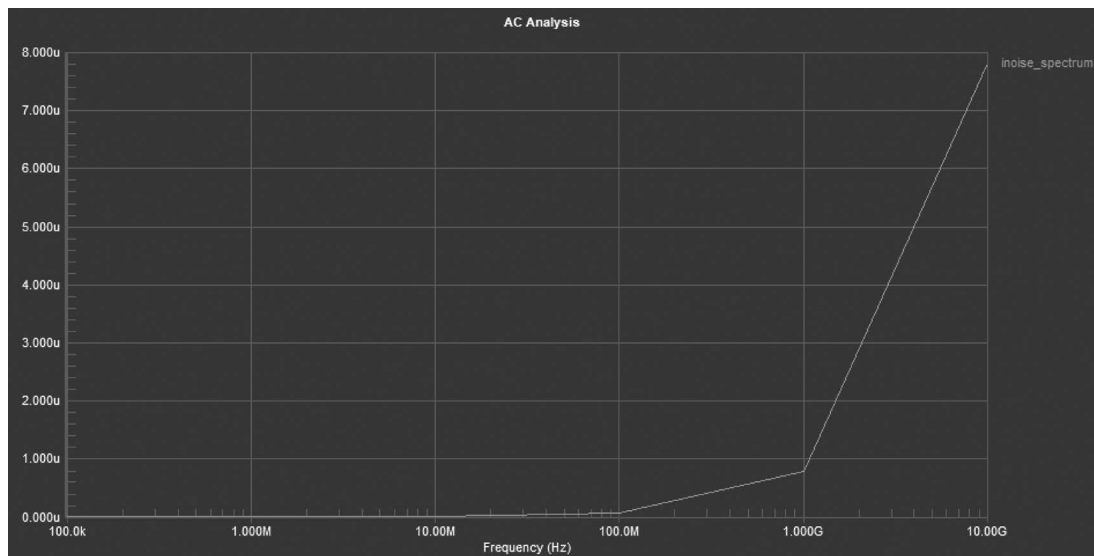


图 3-53 输入噪声谱密度仿真波形

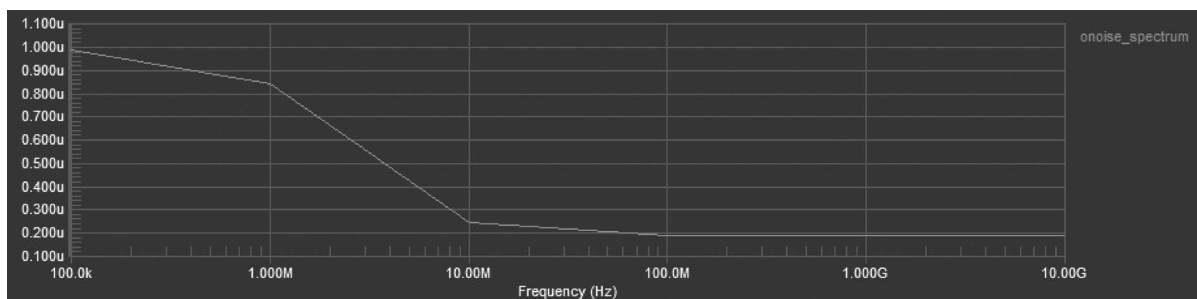


图 3-54 输出噪声谱密度仿真波形

3.7 参数扫描分析

本节将构建用于参数扫描分析的电路,并执行参数扫描分析,主要内容包括修改前面的设计、设置参数扫描分析参数和分析参数扫描的仿真结果。

3.7.1 打开前面的设计

打开前面设计的步骤主要包括:

- (1) 新建一个 parametric_analysis 文件夹,把 transient_analysis 文件夹下的所有文件复制到 parametric_analysis 文件夹下。
- (2) 在 AD 软件中,打开 parametric_analysis 文件夹下的工程文件。

3.7.2 设置参数扫描分析参数

下面介绍设置参数扫描分析参数的方法。其步骤主要包括:

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。

(2) 打开如图 3-55 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置:

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 OUT 处加入 Probes(探针) V_OUT,用于采集对应网络的时域瞬态波形。

③ 在“3. Analysis Setup & Run”中 Transient 选项设置瞬态仿真参数起始时间(From)为 0,停止时间(To)为 30 μ s,步进(Step)为 100ns。

④ 选中 Sweep 选项并单击 Settings 按钮进入 Advanced Analysis Settings 设置窗口,如图 3-56 所示设置扫描参数源为 R1,开始值(From)为 1k Ω ,结束值(To)为 10k Ω ,步进值(Step)为 1k Ω 。

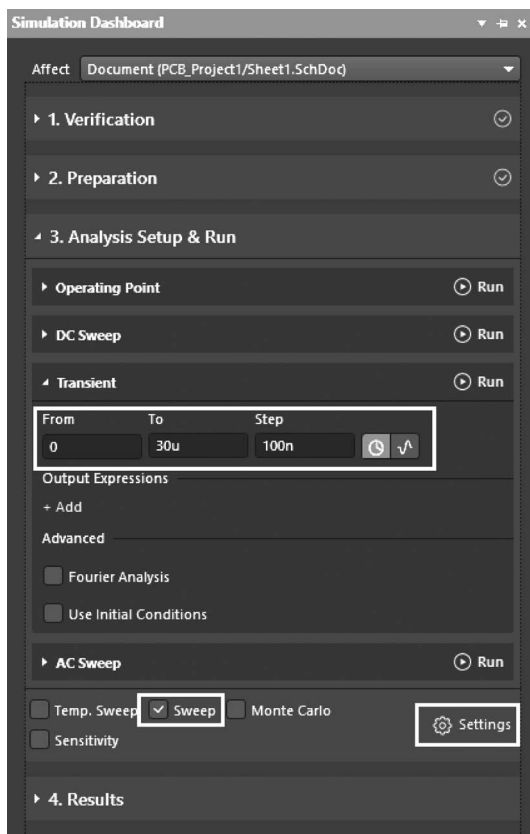


图 3-55 设置瞬态及参数分析参数

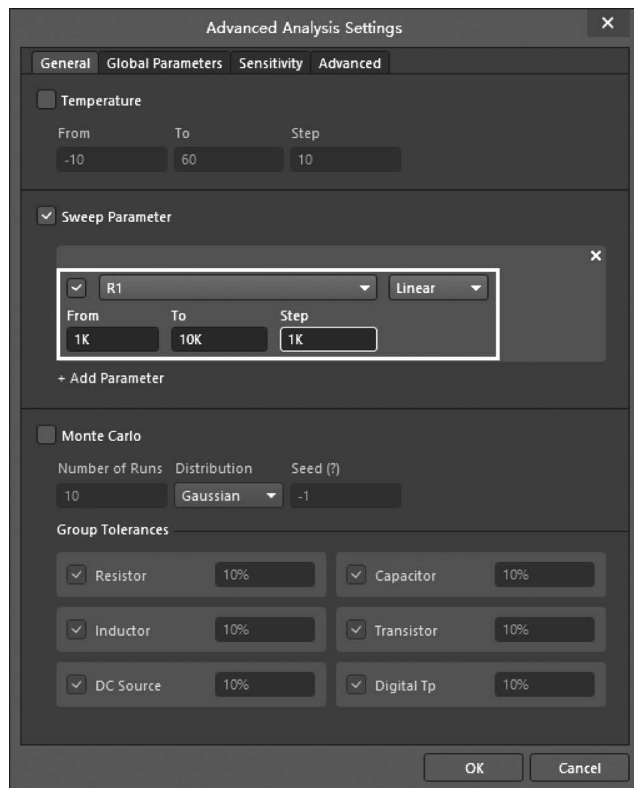


图 3-56 设置参数扫描分析参数

(3) 单击 Transient 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.7.3 参数扫描结果分析

下面对参数扫描的结果进行分析。其步骤主要包括:

(1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。

(2) 自动打开 PCB_Project1.sdf 文件。显示如图 3-57 所示的图形,V(OUT)p1~V(OUT)p10 分别为 R1 在 1~10k Ω 不同阻值下的输出信号时域瞬态波形。

(3) 保存工程文件,并退出设计工程。

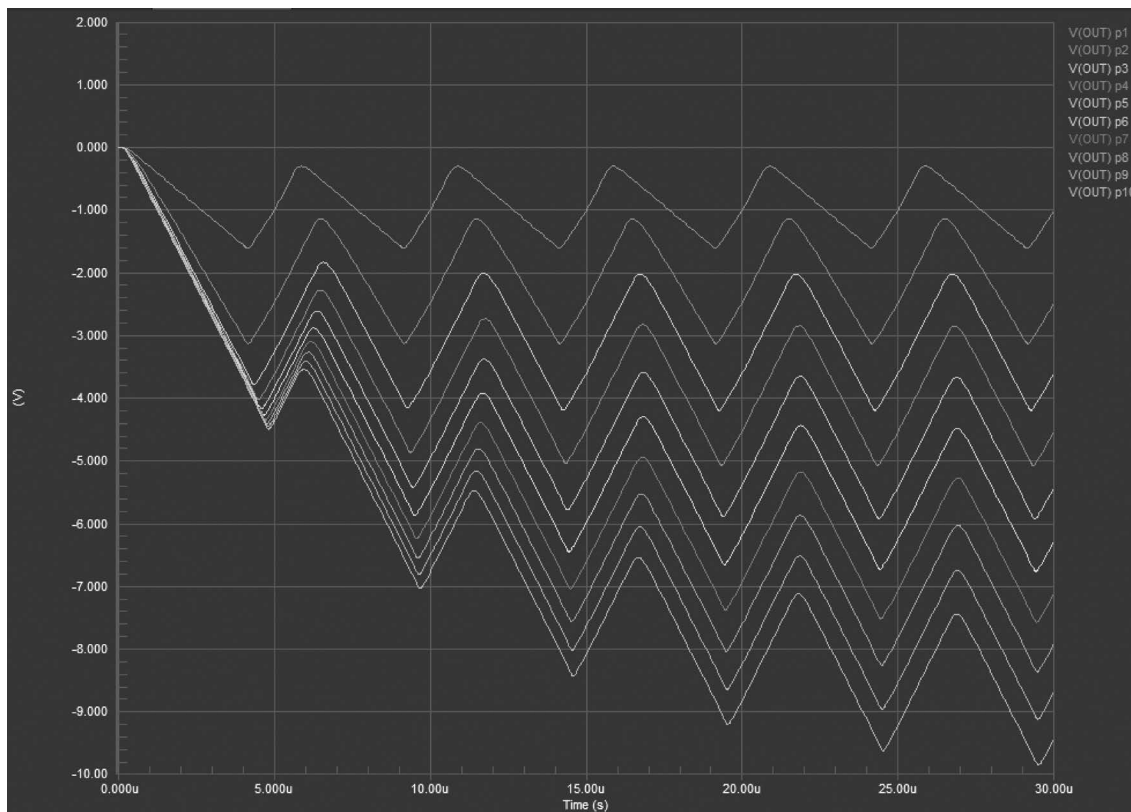


图 3-57 参数扫描仿真波形结果

3.8 温度分析

本节将构建温度分析电路,并执行温度分析,主要内容包括构建温度分析电路、设置温度分析参数和分析温度仿真结果。带有温度系数的器件包括 GaAsFET、电容、二极管、JFET、电感、MOSFET、BJT、电阻和电压开关(只用于噪声计算)。

3.8.1 建立新的温度分析工程

建立新的温度分析电路工程的步骤主要包括:

- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角下,选择“开始”→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,创建一个名称为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名称为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.8.2 构建温度分析电路

构建温度分析电路步骤主要包括:

- (1) 从 Miscellaneous Devices.IntLib 库中分别找到名称为 Res1 的电阻元器件、名称为 Res Tap 的

可变电阻、名称为 Diode IN4148 的二极管、名称为 Diode 18TQ045 的二极管、名称为 Op Amp 的运算放大器,并将其按照图 3-58 所示的位置进行放置。

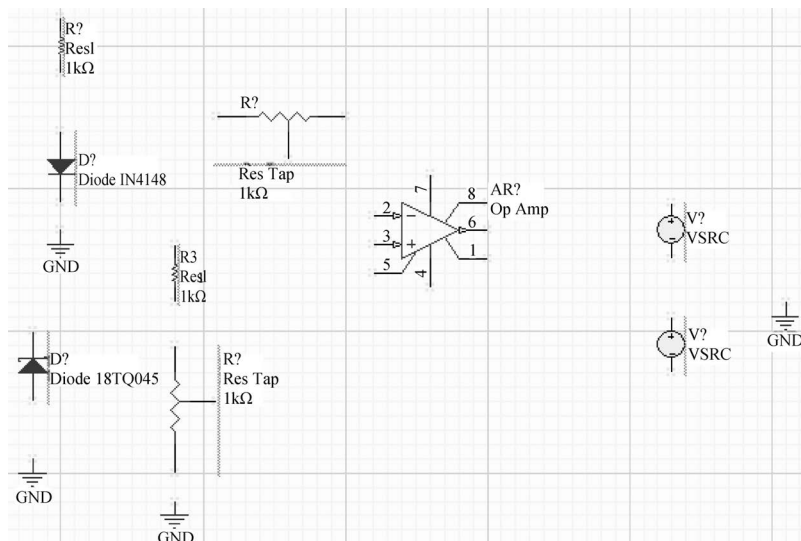



图 3-58 放置元件和信号源

(2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名称为 VSRC 的元器件,并按照图 3-58 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-58 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的连线按钮,将这些元件和信号源按照图 3-59 所示的方式进行连接。

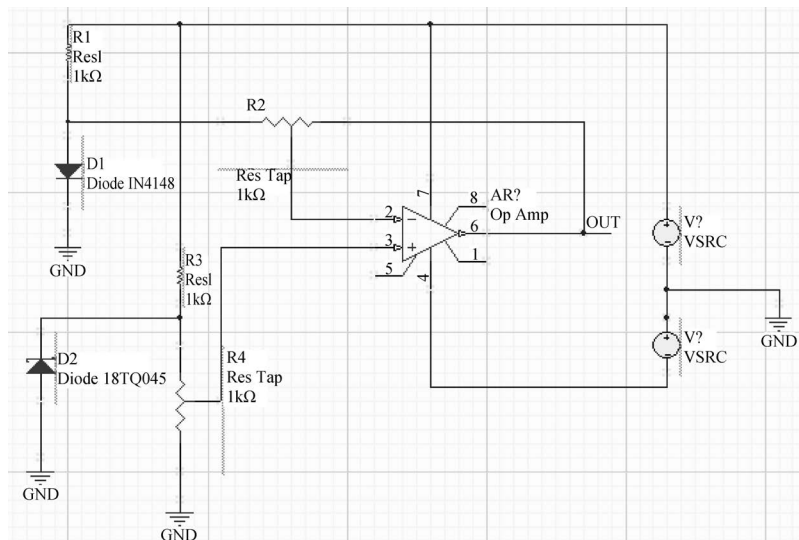


图 3-59 连接电路元件和信号源

(5) 按照前面所介绍的给元件分配标识符的方法,为电路中的元件和信号源分配唯一的标识符。图 3-60 给出分配完标识符后的原理图界面。

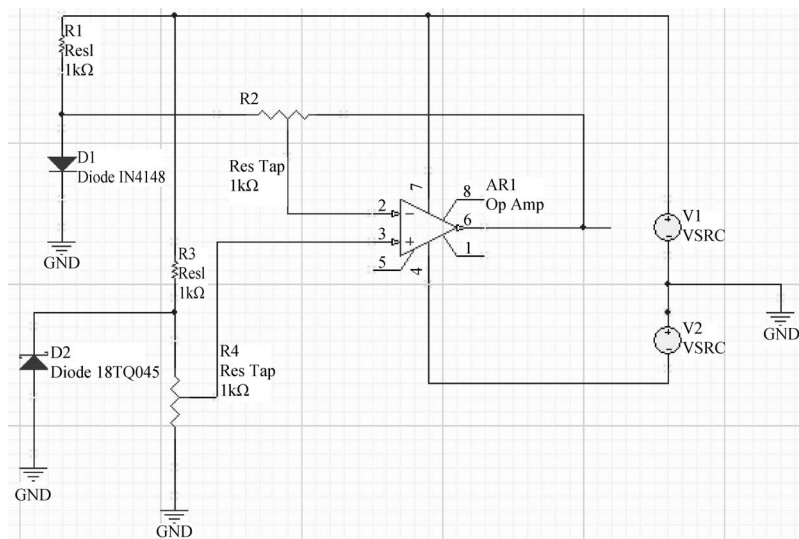


图 3-60 为电路元器件和信号源分配唯一的标识

(6) 如图 3-61 所示,将 V1 和 V2 设置为 +15V,其他元器件参数按图中设置。

(7) 为了方便对仿真结果的分析,如图 3-61 所示,在放大器的输出端放置名称为 OUT 的网络标号。

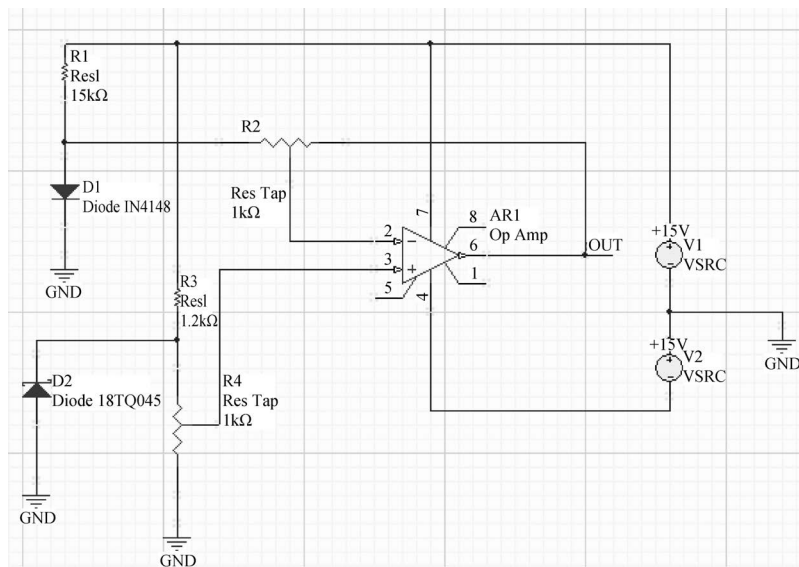


图 3-61 修改电路元器件参数并放置网络标号

(8) 保存设计文件,将其保存到 temperature_analysis 目录下。

3.8.3 设置温度分析参数

下面介绍设置温度分析参数的方法。其步骤主要包括:

(1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。

(2) 打开如图 3-62 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置:

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 OUT 处加入 Probes(探针) V_OUT,用于采集对应网络的时域瞬态波形。

③ 选中 Temp. Sweep 选项,并单击 Settings 按钮进入 Advanced Analysis Settings 窗口,如图 3-63 所示设置温度开始值(From)为 0 度,结束值(To)为 100 度,步进(Step)值为 10 度。

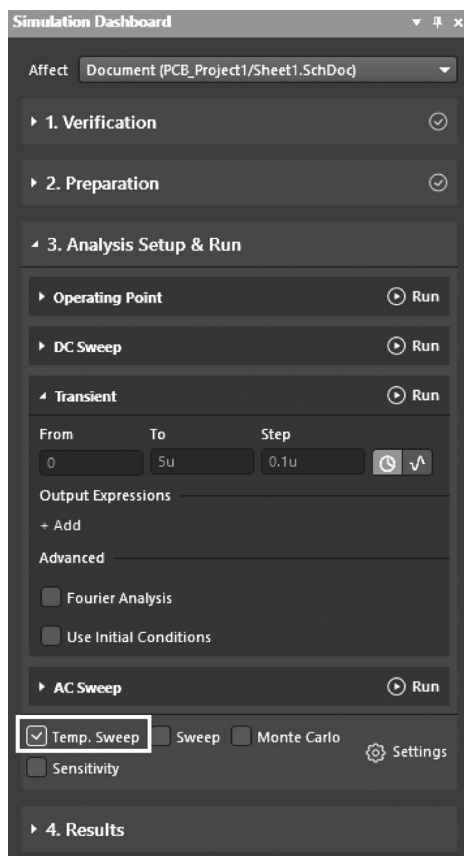


图 3-62 设置瞬态和温度分析参数

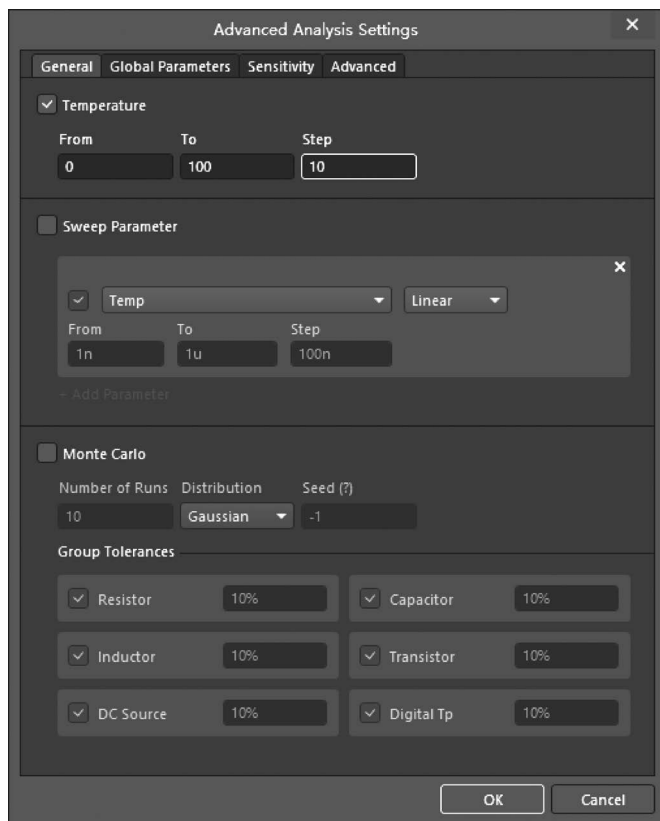


图 3-63 设置温度扫描分析参数

(3) 单击 Transient 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.8.4 温度仿真结果分析

下面对温度仿真结果进行分析。其步骤主要包括:

(1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框,关闭该对话框。

(2) 自动打开 PCB_Project1.sdf 文件。如图 3-64 所示,显示 V(OUT)t1~V(OUT)t11 分别在 0~100℃ 不同温度下的输出信号时域瞬态波形。

(3) 保存工程文件,将其保存 temperature_analysis 目录下,退出设计工程。

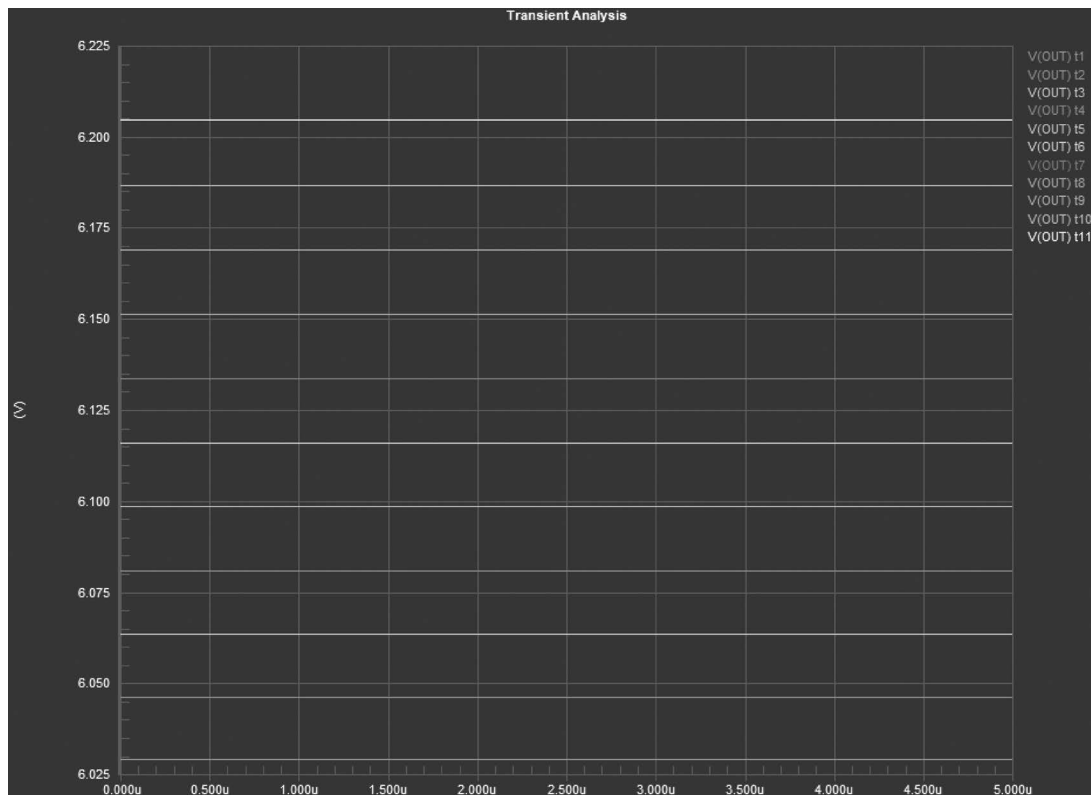


图 3-64 温度扫描仿真结果

3.9 蒙特卡洛分析

本节将构建蒙特卡洛分析电路,并执行蒙特卡洛分析,主要包括构建蒙特卡洛分析电路、设置蒙特卡洛分析参数和分析蒙特卡洛仿真结果。

3.9.1 建立新的蒙特卡洛分析工程

建立新的蒙特卡洛分析电路工程的步骤主要包括:


- (1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角下,选择【开始】→Altium Designer 命令,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 软件主界面菜单下选择 File→New→Project 命令,创建一个名称为 PCB_Project1. PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名称为 Sheet1. SchDoc 的原理图文件。

3.9.2 构建蒙特卡洛分析电路

下面构建用于蒙特卡洛分析的单个 BJT 放大电路。其步骤主要包括:

- (1) 从 Miscellaneous Devices. IntLib 库中分别找到名称为 Res1 的电阻元器件、名称为 Cap 的电容元器件、名称为 2N3904 的晶体管,并将其按照图 3-65 所示的位置进行放置。

(2) 从 Simulation Sources. IntLib 库中找到名称为 VSRC 和 VSIN 的元器件, 并按照图 3-65 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的  按钮, 将 GND 按照图 3-65 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 软件主界面下工具栏内的连线按钮, 将这些元器件和信号源按照图 3-66 所示的方式进行连接。

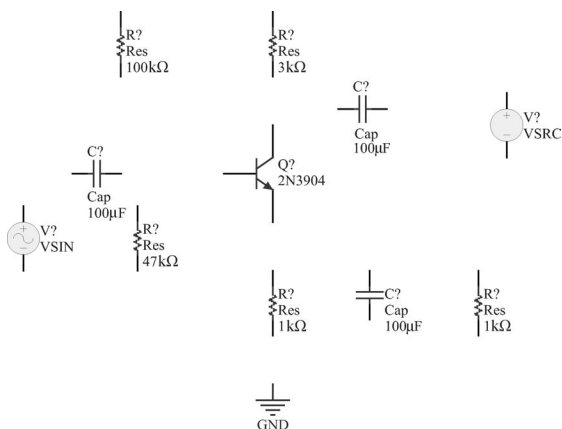


图 3-65 放置元器件和信号源

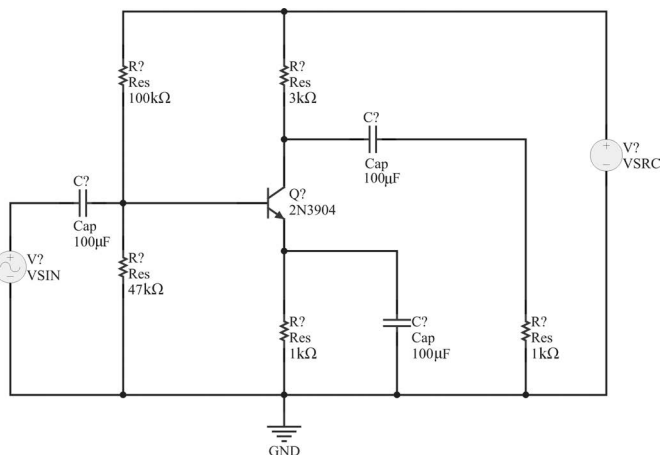


图 3-66 连接电路元器件和信号源

(5) 按照前面所介绍的为元器件分配标识符的方法, 为电路中的元器件和信号源分配唯一的标识符。图 3-67 给出分配完标识符后的原理图界面。

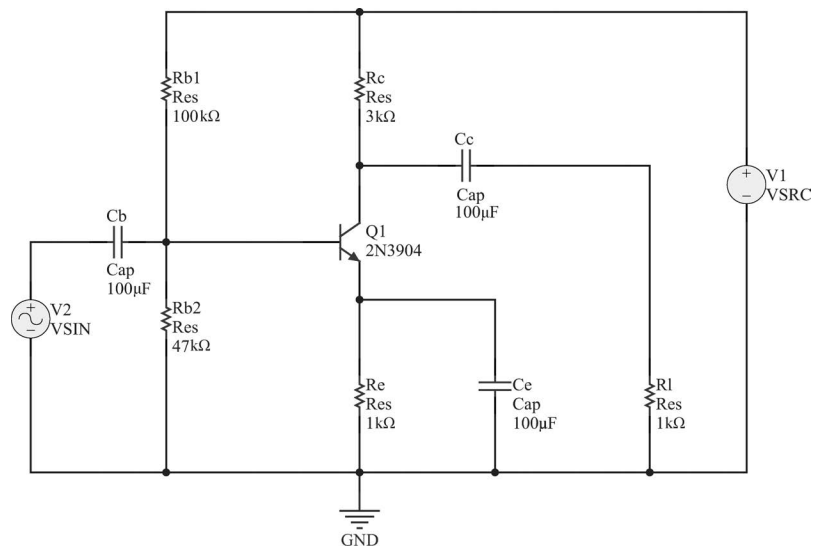


图 3-67 为电路元器件和信号源分配唯一的标识符

(6) 如图 3-68 所示, 将元器件参数按照图中设置。

(7) 为了方便对仿真结果的分析, 按照图 3-68 所示的电路, 在电容 C_c 的输出端放置名称为 OUT 的网络标号。

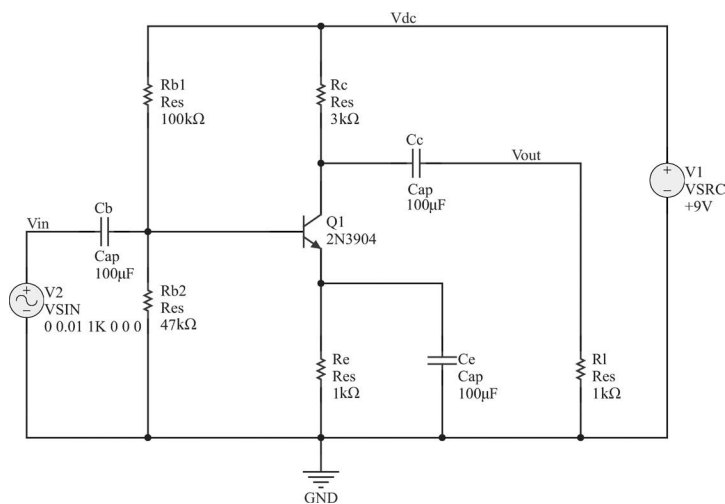


图 3-68 修改电路元器件参数和放置网络符号

3.9.3 设置蒙特卡洛分析参数

下面介绍设置蒙特卡洛分析参数的方法。其步骤主要包括：

- (1) 在 AD 软件主界面菜单下选择 Simulate→Simulation Dashboard 命令。
- (2) 打开如图 3-69 所示的 Simulation Dashboard 界面,按下面参数设置：

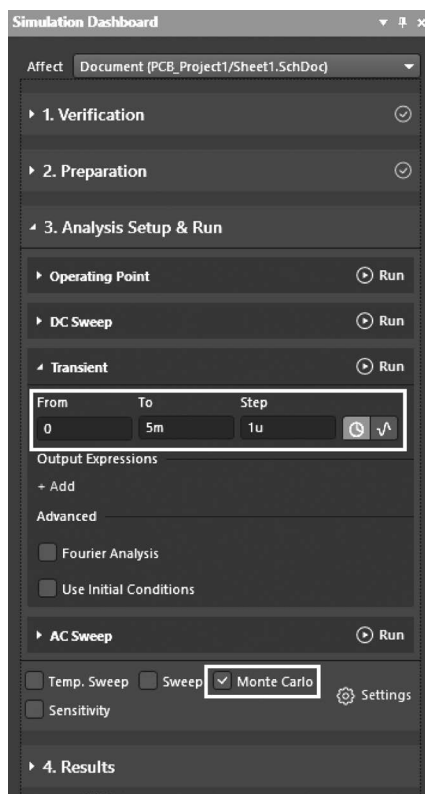


图 3-69 设置瞬态和蒙特卡洛分析参数

① 在“1. Verification”中单击 Start Verification 按钮进行电路检查,检查通过后 Electrical Rule Check 和 Simulation Models 标识为绿色对号。

② 在“2. Preparation”中 Probes 界面单击 Add 按钮选择 Voltage,在网络 OUT 处加入 Probes(探针) V_OUT,用于采集对应网络的时域瞬态波形。

③ 在“3. Analysis Setup & Run”中 Transient 选项设置瞬态仿真参数起始时间(From)为 0,停止时间(To)为 5ms,步进(Step)为 1 μ s。

④ 选中 Monte Carlo 选项并单击 Settings 按钮进入 Advanced Analysis Settings 窗口,如图 3-70 所示设置运行次数(Number of Runs)为 30,分布(Distribution)为 Uniform,种子值(Seed)为 32767,将所有的 Tolerance(公差)设置为 10%。

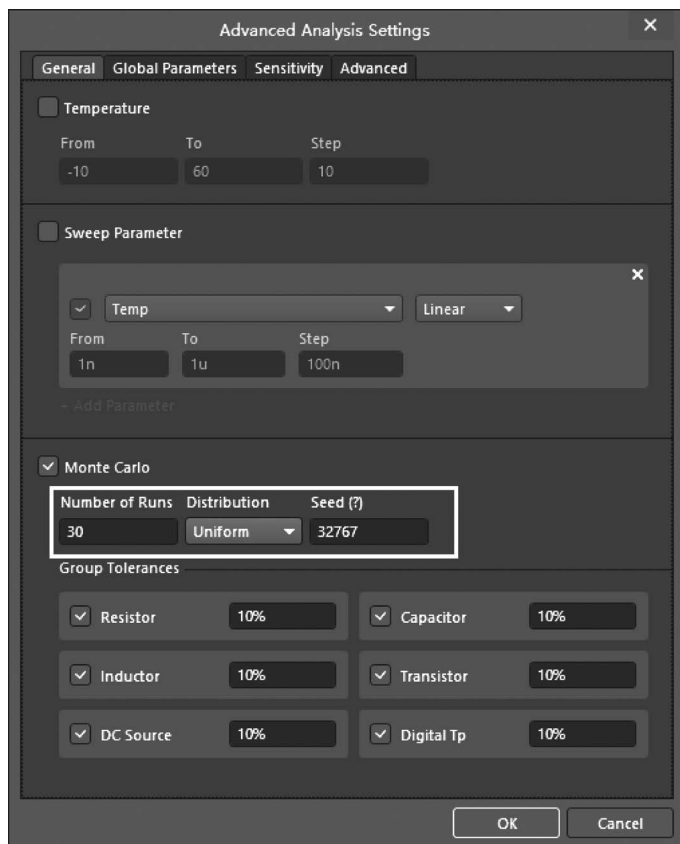


图 3-70 设置蒙特卡洛分析参数

(3) 单击 Transient 选项 Run 按钮,开始执行仿真。

3.9.4 蒙特卡洛仿真结果分析

下面对蒙特卡洛仿真结果进行分析。其步骤主要包括:

(1) 运行 Spice 仿真后,弹出消息对话框。关闭该对话框。
 (2) 自动打开 PCB_Project1. sdf 文件。仿真波形显示如图 3-71 所示, V(OUT)m1~V(OUT)m3D 分别为在不同蒙特卡洛参数下输出信号时域瞬态波形。

(3) 保存工程文件,将其保存到 montecarlo_analysis 目录下,退出设计工程。

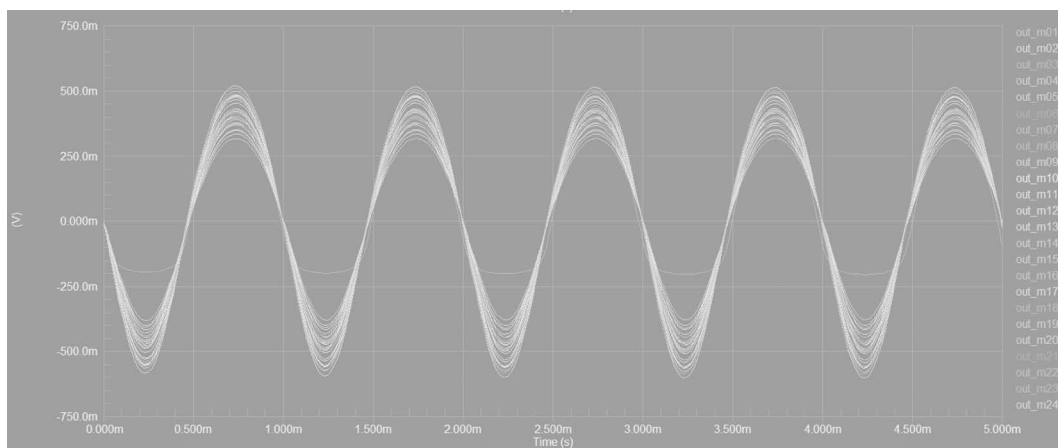


图 3-71 蒙特卡洛分析结果