

第3章 电子电路设计与仿真

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,并执行直流工作点分析,主要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

下面首先给出建立直流分析电路工程的步骤。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,打开 AD 软件。

(2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,创建一个名为 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

下面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 主界面工具栏下单击  按钮,打开如图 3-1 所示的元器件库浏览界面(若没有,可在 Design 中找到)。

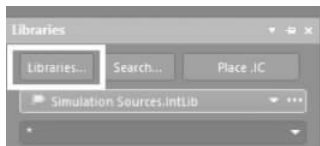


图 3-1 元器件库浏览界面

(2) 在图 3-1 所示的界面内,单击 Libraries 按钮,打开如图 3-2 所示的 Available Libraries(可利用的库)界面,选择 Installed 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。

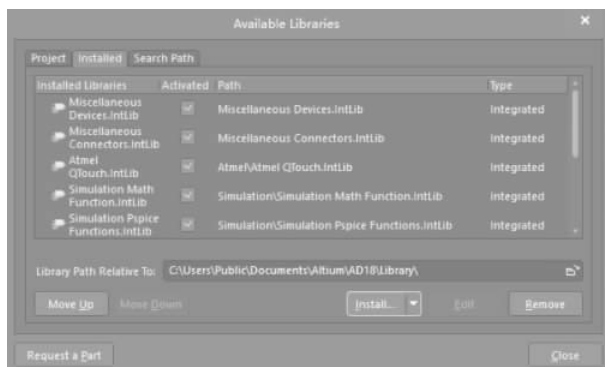


图 3-2 添加库浏览界面

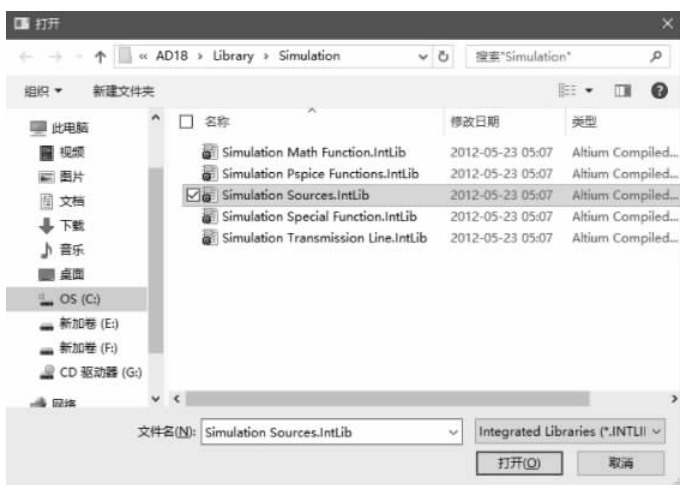


图 3-3 打开需要添加的仿真库

- ① 将路径指向 C:\users\Public\Documents\Altium\AD18\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。

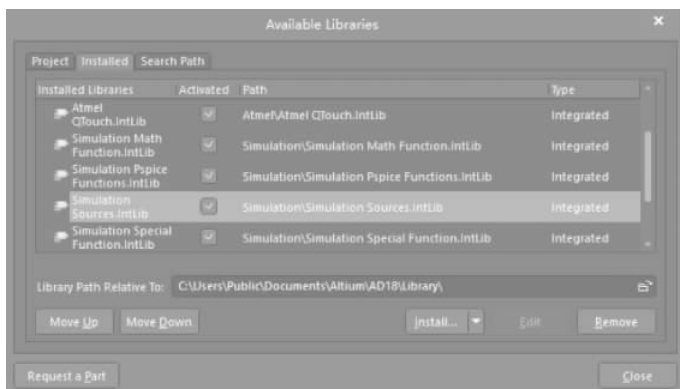


图 3-4 已经添加了需要添加的仿真库

3.1.3 构建直流分析电路

下面构建直流分析电路。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 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-5 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 主界面下的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。

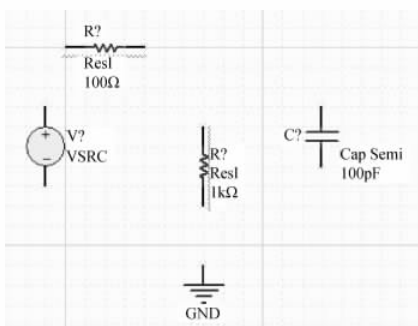


图 3-5 查找仿真元器件到原理图设计界面

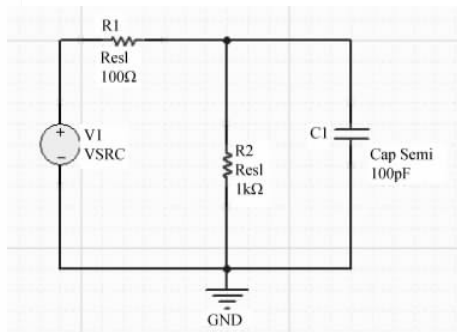


图 3-6 为电路中的所有元器件分配唯一的标识符

(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 行,在右侧输入 5V。

③ 单击 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。

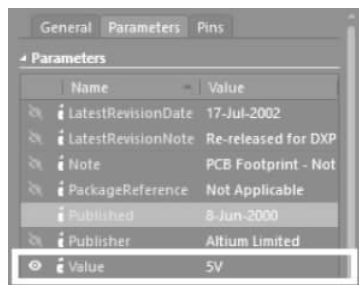


图 3-7 修改 V1 参数

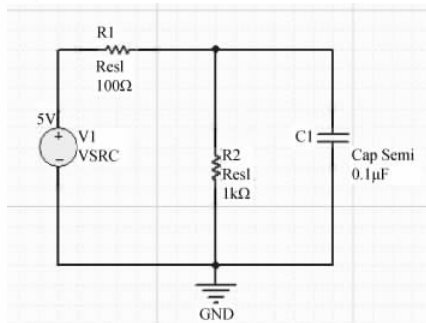


图 3-8 修改完所有的参数

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

(8) 保存设计文件,将其保存在 dc_analysis 目录下(读者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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。

如果 Simulate 那一栏是空的,则是因为安装软件时没安装仿真模块。可以通过选择 Help→About→Extension&Updates 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 按钮重启一下就好。

(2) 打开如图 3-10 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面。按下面参数设置:

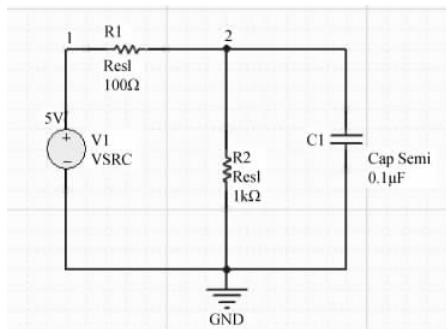


图 3-9 指定网络标号

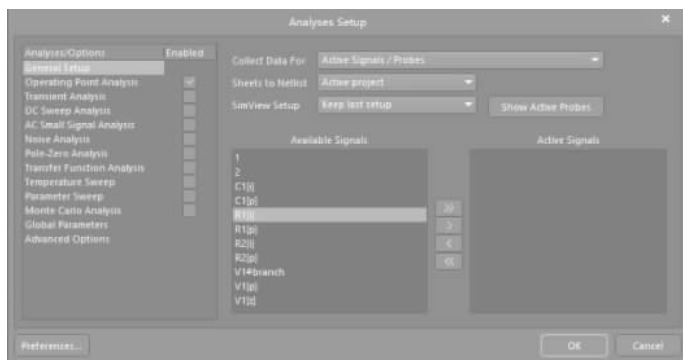


图 3-10 设置直流分析参数

① 在 General Setup(通用设置)项内设置:

- Collect Data For: Active Signals/Probes(搜集数据用于: 活动信号/探针)。
- 在 Available Signals(可用的信号)中选择 1 和 2,将其分别添加到 Active Signals(活动信号)栏中。

② 选中 Operating Point Analysis(操作点分析)。

③ 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,开始执行仿真。

建议添加 v1 # branch 到右侧 ActiveSignal,因为后面要查看它。如果 V(1)、V(2)无法查看,请使用后面的 AddWave 的方式查看。

3.1.5 直流工作点仿真结果分析

下面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。

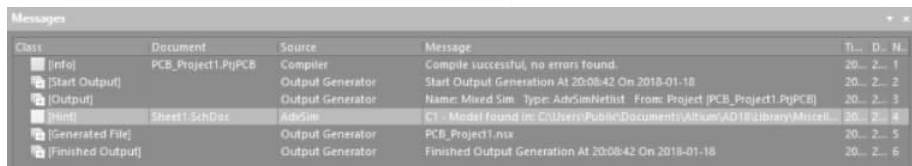


图 3-11 消息窗口

(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。

(4) 下面进一步通过软件计算得到流经 R1 和 R2 电阻的电流值。按下面步骤进行操作:

- ① 在图 3-12 所示的界面上,单击鼠标右键,出现快捷菜单,选择 Add Wave。
- ② 出现图 3-13 所示的界面,在 Expression 右侧输入 v1# branch。



图 3-12 文件中显示 V(1)和 V(2)值

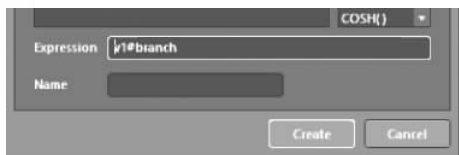


图 3-13 添加计算公式

③ 单击 Create 按钮。

(5) 如图 3-14 所示,流经电阻的电流为 4.545mA。

(6) 将该工程保存到 dc_analysis 目录下,并退出该设计工程,如图 3-15 所示。

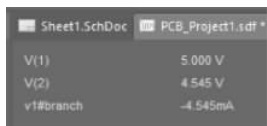


图 3-14 计算电流的结果

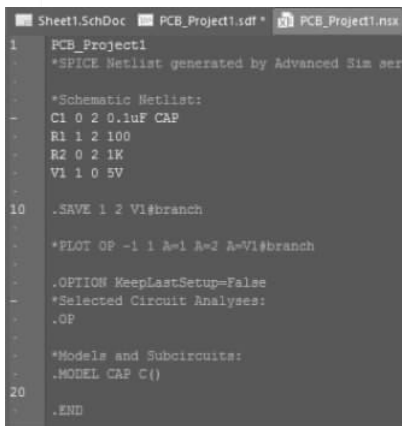


图 3-15 Spice 直流分析程序

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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。
- (2) 打开如图 3-16 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置：

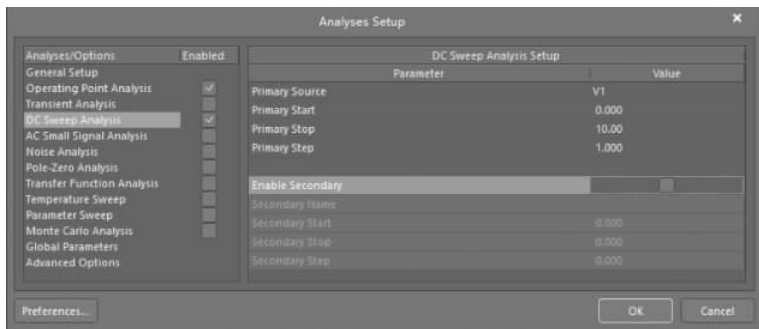


图 3-16 设置直流扫描分析参数

选中 DC Sweep Analysis 复选框。

- (3) 打开 DC Sweep Analysis Setup(DC 扫描分析设置)界面,按下面参数设置：

- ① Primary Source: V1。
- ② Primary Start: 0.000。
- ③ Primary Stop: 10.00。
- ④ Primary Step: 1.000。
- ⑤ 其余参数按默认设置。
- (4) 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,开始执行仿真。

3.2.3 直流扫描仿真结果分析

下面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：

- (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,在该文件下有两个标签：一个是 Operating Point (操作点)；另一个是 DC Sweep (DC 扫描)。单击 DC

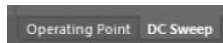


图 3-17 选择 DC Sweep 标签

Sweep 标签。

(3) 在出现的 PCB_Project1. sdf 空白界面中单击鼠标右键,出现快捷菜单,选择 Add Plot。

(4) 出现图 3-18 所示的 Plot Wizard-Plot Title(图形向导-图形标题,即三个步骤中的第一个步骤)。在 What title should this plot have(这个图形的标题是什么)中,根据自己的习惯给该图形命名,在此给出的名称是 V2,单击 Next 按钮。

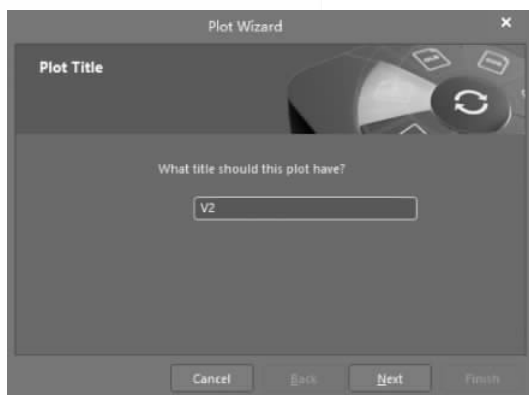


图 3-18 添加图形的配置界面 1

(5) 出现如图 3-19 所示的界面。该界面用来选择需要显示的条项,不需要修改任何参数,单击 Next 按钮。



图 3-19 添加图形的配置界面 2

(6) 出现如图 3-20 所示的界面。在该界面中,添加需要查看的波形,单击 Add 按钮。

(7) 出现图 3-21 所示的界面。在 Wave Setup 下面选择 V(2)条目,并双击该选项,可以看到在 Expression 右侧出现了 V(2)。

(8) 单击 Create 按钮。

(9) 在图 3-20 所示的界面中,添加名为 V(2)的波形。在该界面中单击 Next 按钮。

(10) 出现 Plot Wizard-Finish 界面。

(11) 单击 Finish 按钮。

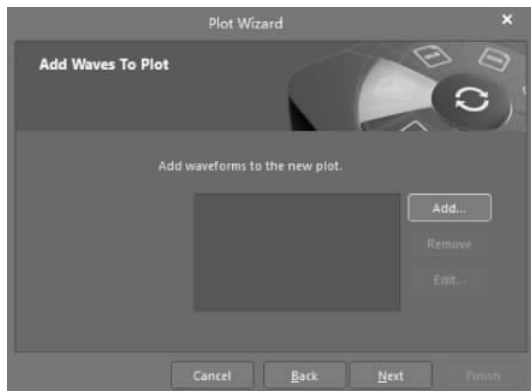


图 3-20 添加图形的配置界面 3



图 3-21 选择需要观察的信号

(12) 出现如图 3-22 所示的 $V(2)$ 波形。

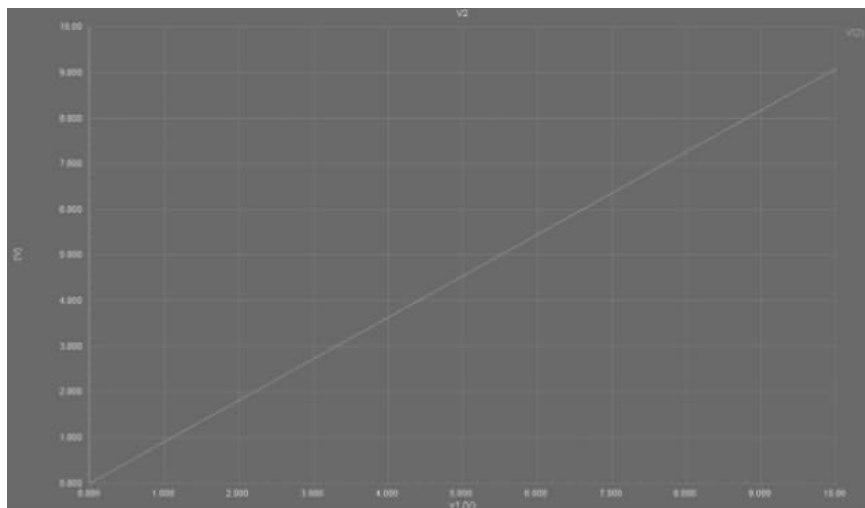


图 3-22 $V(2)$ 波形

(13) 保存设计工程,并关闭该设计工程。

3.3 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,主要内容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。

3.3.1 建立新的交流小信号分析工程

下面首先给出建立交流小信号分析电路工程的步骤。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,打开AD 软件。
- (2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,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,添加名字为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.3.2 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 库中分别找到名字为 Res1 的电阻元器件、名字为 Cap 的电容元器件、名字为 1N4001 的二极管(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将这些元器件按照图 3-23 所示的位置进行放置。

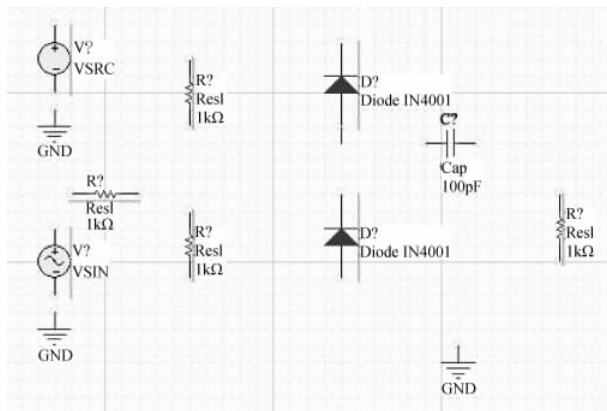


图 3-23 放置元器件和信号源

- (2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名字为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按按照图 3-23 所示的位置进行放置。

- (3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-23 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-24 所示的方式进行连接。

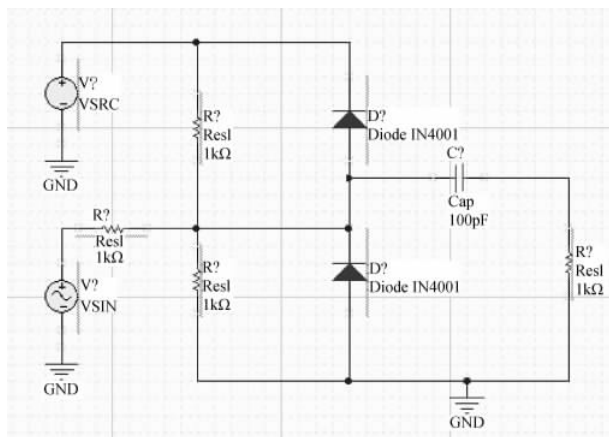


图 3-24 连接电路中的所有元器件

(5) 按照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 3-25 给出了分配完标识符后的原理图界面。

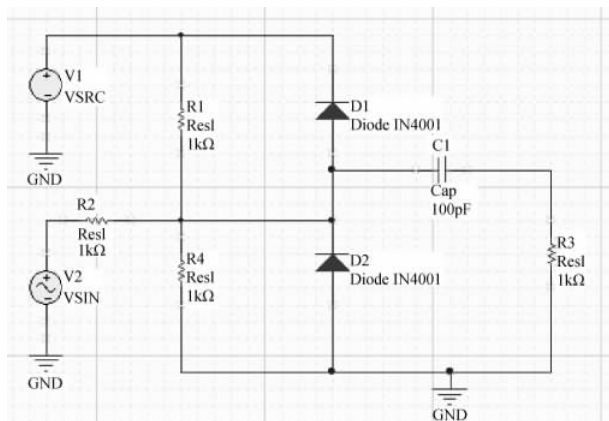


图 3-25 为电路中的元器件分配唯一的标识符

(6) 按照图 3-26 所示,修改电路中元器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。

① 双击 V2 交流信号源符号,打开其配置界面。

② 单击其配置界面 General 选项卡下方的 Models 选项的  按钮对 VSIN 进行编辑,打开图 3-27 所示的信号源参数对话框。在该对话框中有下面三个标签:

- Model Kind(模型种类)。
- Parameters(参数)。
- Port Map(端口映射)。

③ 从图形中可以看出,当前选择的是 Sinusoidal,单击 Parameters 标签栏,可以看到

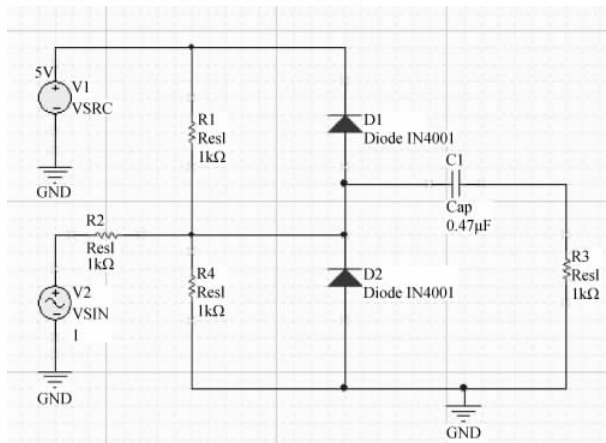


图 3-26 修改后的参数

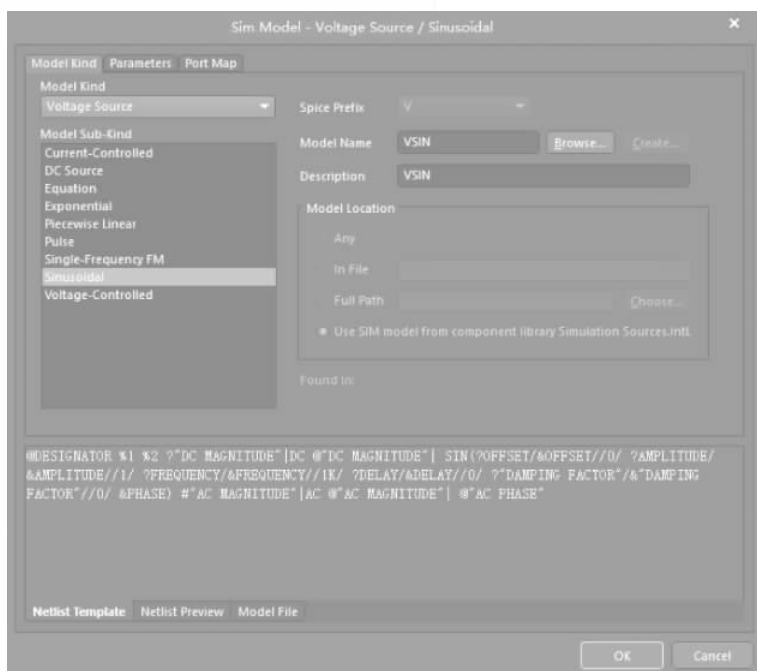


图 3-27 修改信号源配置参数界面

正弦信号的参数,在该界面下可以对该信号源的参数进行修改,如图 3-28 所示。在右侧 Component parameter(元器件参数)中选中相应的参数,就可以在原理图界面中看到该参数。

(7) 为了分析方便,按图 3-29 所示为电路的一些节点指定网络标识符。

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

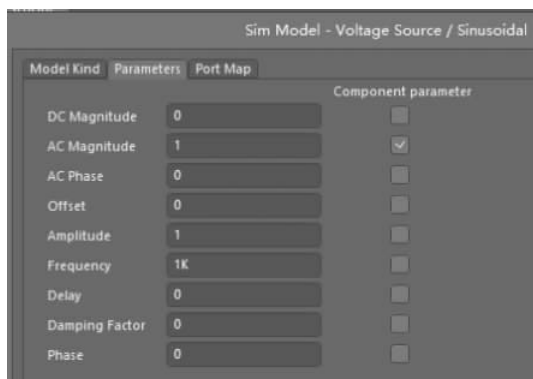


图 3-28 修改正弦信号源配置参数界面

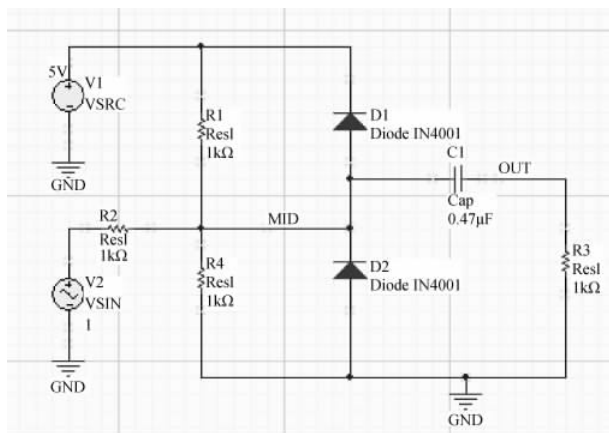


图 3-29 为电路指定网络标识符

3.3.3 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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。
- (2) 打开如图 3-30 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置。

① 在 General Setup(通用设置)项内设置：

- Collect Data For: Active Signals/Probes(搜集数据用于：活动信号/探针)。
- 在 Available Signals(可用的信号)中选择 MID 和 OUT,将其添加到 Active Signals(活动信号),如图 3-30 所示。

② 选中 AC Small Signal Analysis(AC 小信号分析),出现 AC Small Signal Analysis Setup(AC 小信号分析设置)界面,按图 3-31 界面设置参数。

- Start Frequency(起始频率): 10.00。
- Stop Frequency(结束频率): 100.0meg。
- Sweep Type(扫描类型): Decade。

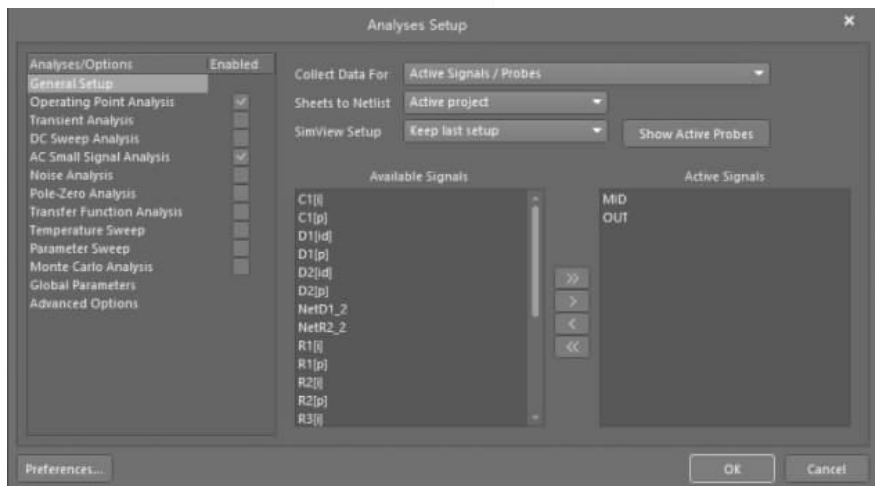


图 3-30 设置通用分析参数

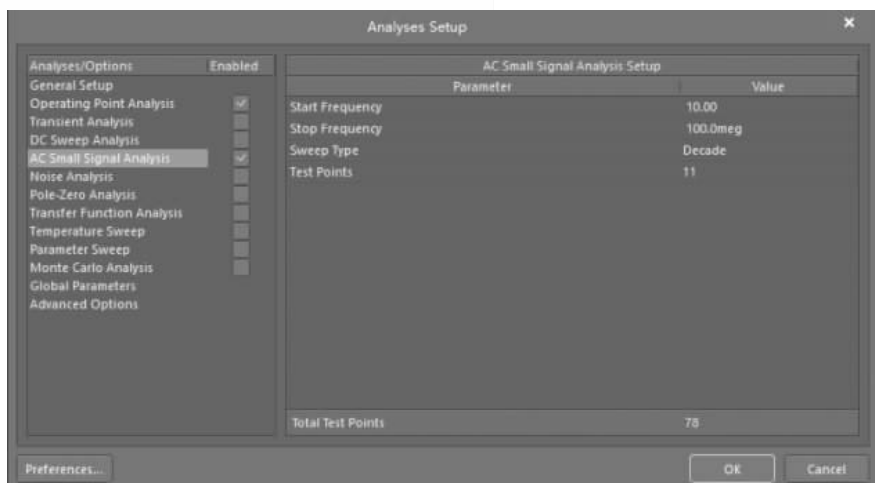


图 3-31 设置交流分析参数

- Test Points(测试点): 11。

③ 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,开始运行仿真。

3.3.4 交流小信号仿真结果分析

下面介绍通过图形观察交流小信号仿真结果的方法。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 3-32 所示,在该文件下有两个标签,其中一个是 Operating Point,另一个是 AC Analysis,单击 AC Analysis 标签。
- (3) 如图 3-33 所示,可以看到 MID 和 OUT 两个网络节



图 3-32 AC Analysis 标签

点的交流小信号分析的结果。

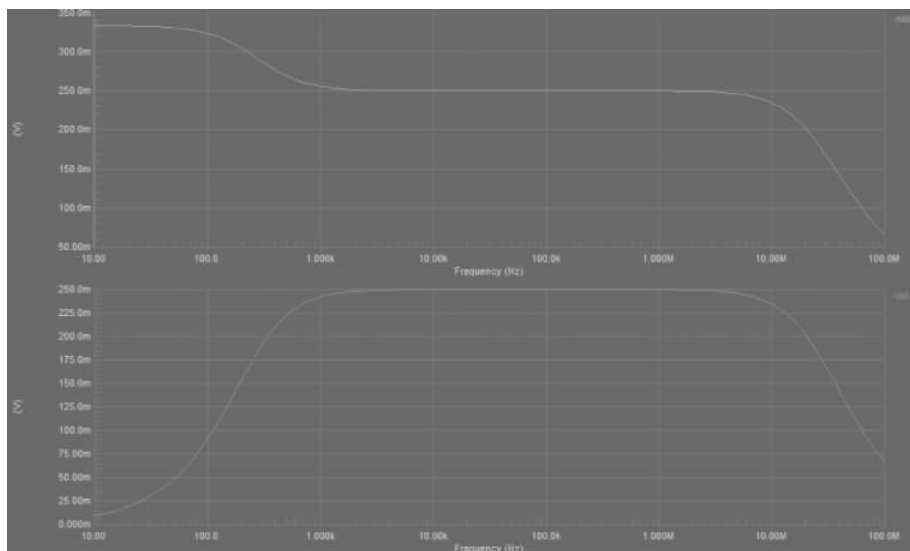


图 3-33 交流小信号分析结果

下面将在图 3-33 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 3-33 所示的界面的上面 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 3-34 所示的界面。在该界面内按如下设置:



图 3-34 添加波形选择窗口

- ① 在 Waveforms 窗口下选择 mid。
 - ② 在 Complex Functions 下选择 Magnitude(dB)。
 - ③ 选中 Add to new Y axis(添加新的 Y 轴)选项。
- (2) 单击 Create 按钮。
- (3) 在图 3-35 所示界面的 mid 图形中添加了 Y 轴。

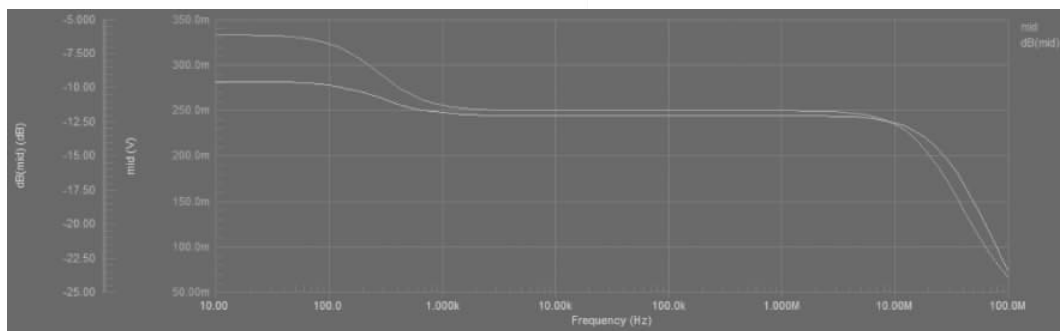


图 3-35 mid 添加的新波形

(4) 按照前面的方法,为 out 添加波形。图 3-36 给出了 out 添加的新波形。

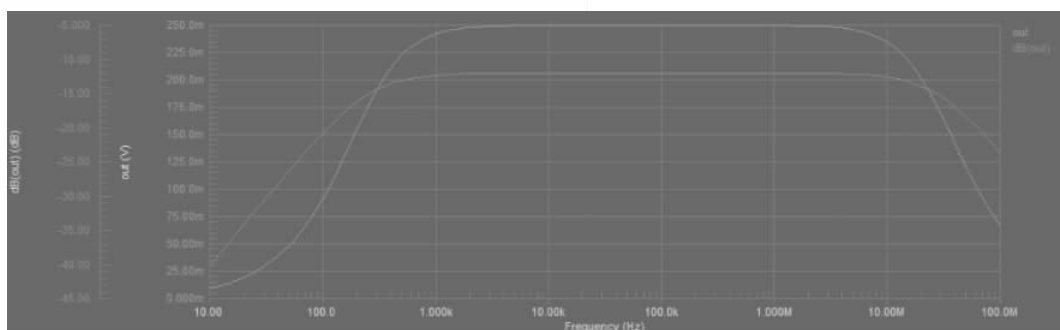


图 3-36 out 添加的新波形

(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。

3.4 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。

3.4.1 建立新的瞬态分析工程

下面首先给出建立瞬态分析电路工程的步骤。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,打开 AD 软件。

(2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,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,添加名字为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.4.2 构建瞬态分析电路

下面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 的电容器、名为 Op Amp 的运算放大器(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将其按照图 3-37 所示的位置分别进行放置。

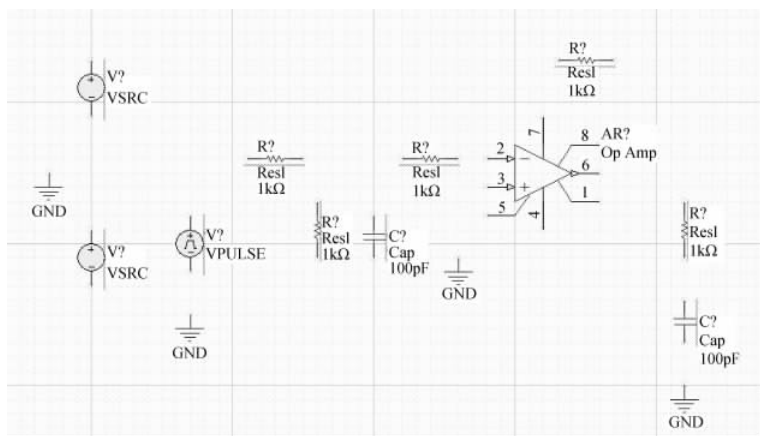


图 3-37 放置元器件和信号源

(2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名为 VSRC 和 VPULSE 的元器件,并按照图 3-37 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-37 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-38 所示的方式进行连接。

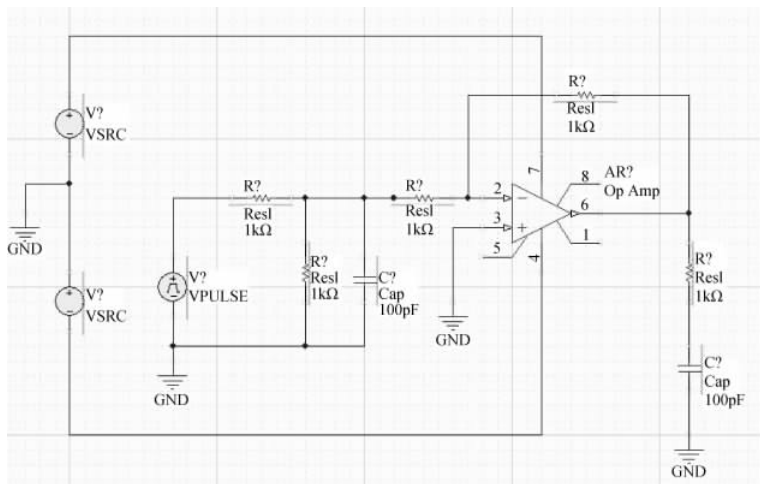


图 3-38 连接电路元器件和信号源

(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 3-39 给出分配完标识符后的原理图界面。

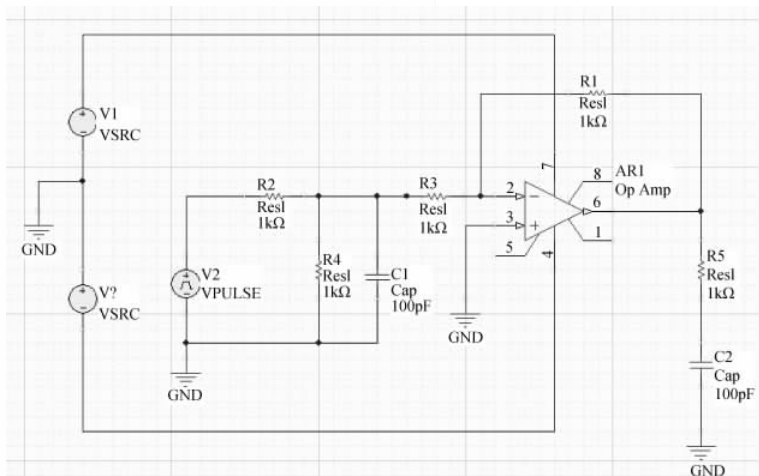


图 3-39 为电路元器件和信号源分配唯一的标识符

(6) 在如图 3-40 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 3-40 所示的电路,在放大器的输入和输出端分别放置名字为 IN 和 OUT 的网络标号。

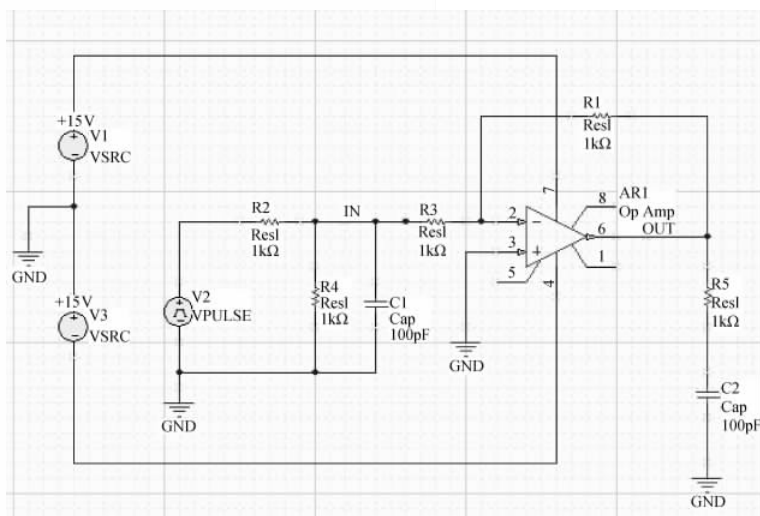


图 3-40 添加 IN 和 OUT 网络标号

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

3.4.3 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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。

(2) 出现如图 3-41 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置:

① 选中 Operating Point Analysis 和 Transient Analysis 选项,执行直流工作点和瞬态分析功能。

② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。

③ 将 IN 和 OUT 添加到 Active Signals 栏中。

(3) 选择 Transient Analysis 选项,出现如图 3-41 和图 3-42 所示的 Transient Analysis Setup(瞬态分析设置)界面。按下面参数设置:

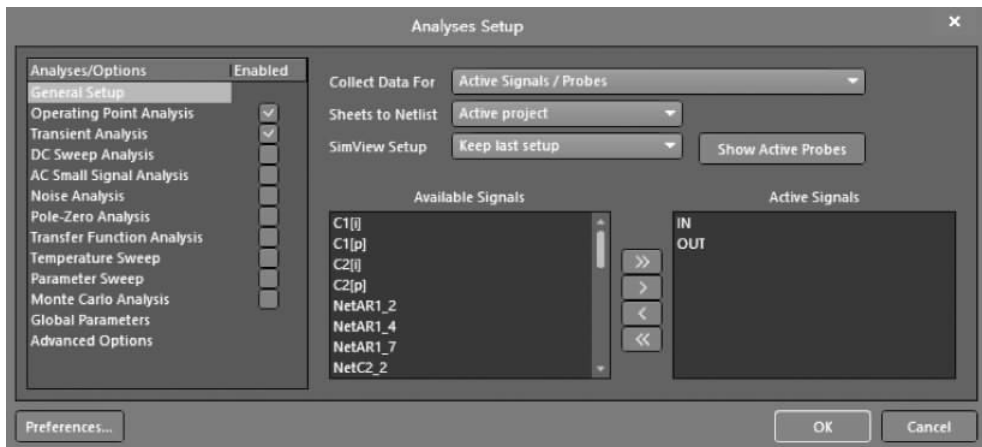


图 3-41 设置仿真参数界面 1

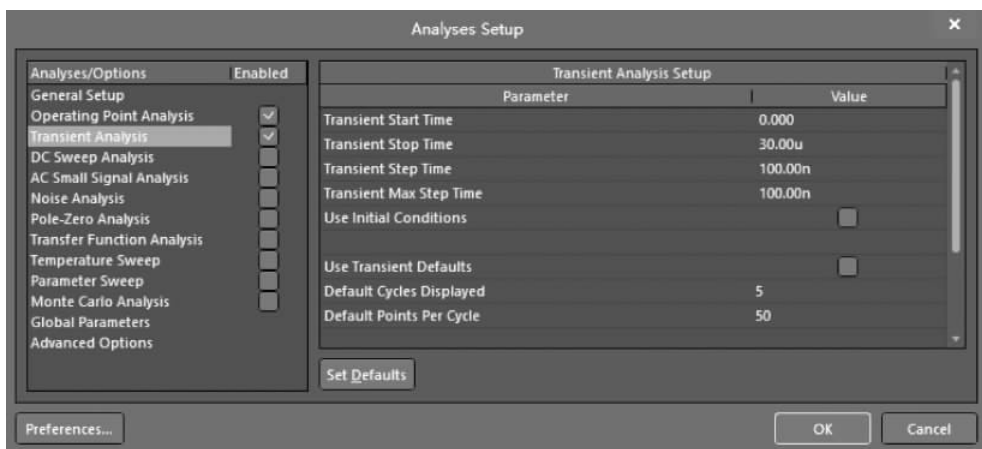


图 3-42 设置仿真参数界面 2

① 不选择 Use Transient Defaults(使用瞬态默认)选项,表示设计者定制瞬时分析参数。

② 在 Transient Stop Time(瞬时停止时间)后面输入 30.00u。

③ 其他按默认参数设置。

(4) 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,运行仿真。

3.4.4 瞬态仿真结果分析

下面介绍通过图形观察瞬态仿真的结果的方法。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。如图 3-43 所示,在该文件下有两个标签,其中一个 Operating Point,另一个是 Transient Analysis,单击 Transient Analysis 标签。



图 3-43 选择 Transient Analysis 标签

(3) 如果不显示图 3-44 所示的图形,则按照前面的方法添加 in 和 out 波形。

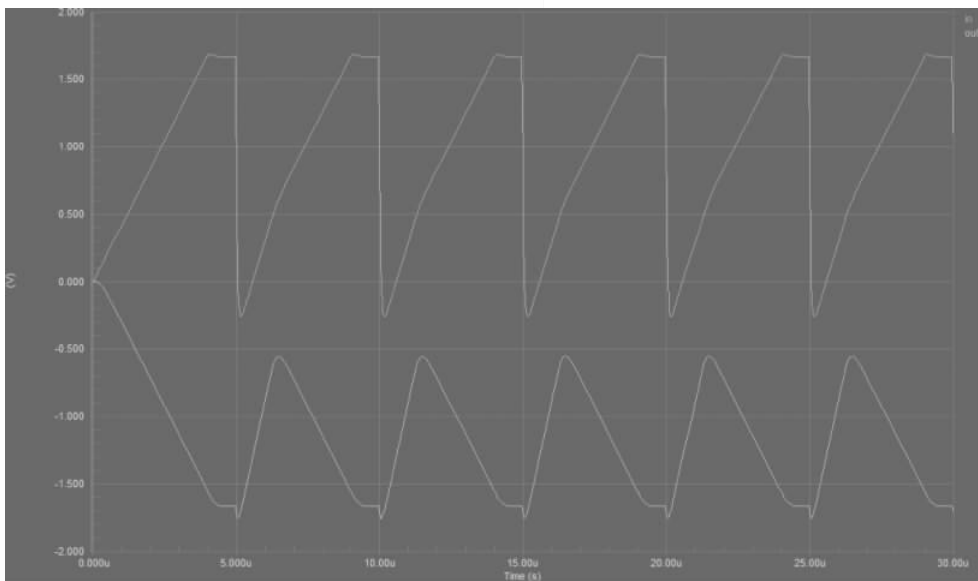


图 3-44 仿真结果波形

(4) 保存工程文件,将其保存到 transient_analysis 目录下,并退出该工程。

3.5 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、设置参数扫描参数和分析参数扫描的仿真结果。

3.5.1 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。

3.5.2 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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。
- (2) 打开如图 3-45 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面。按下面参数设置：

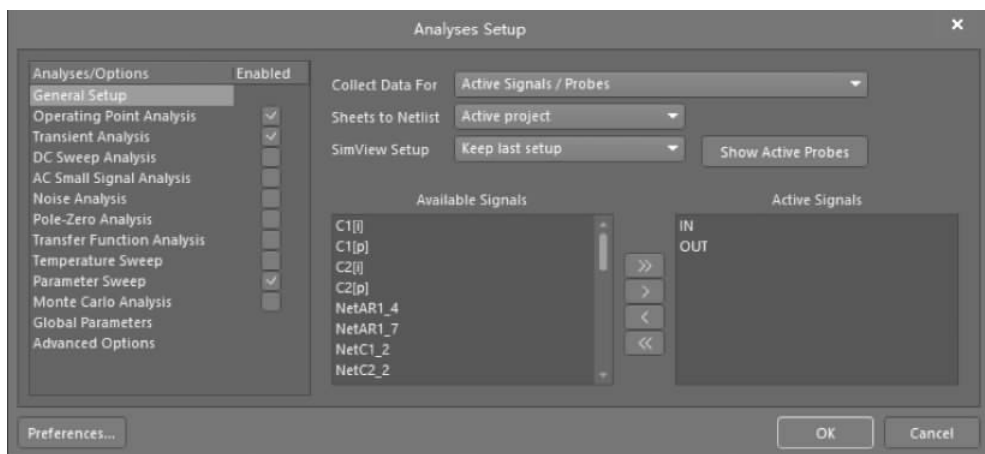


图 3-45 设置仿真参数界面 1

① 选中 Operating Point Analysis、Transient Analysis 和 Parameter Sweep 选项,执行直流工作点、瞬态分析和参数扫描功能。

② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。

③ 将 IN 和 OUT 添加到 Active Signals 栏中。

(3) 选择 Parameter Sweep 选项,出现如图 3-46 所示的 Parameter Sweep Setup(参数扫描设置)界面。按下面参数设置：

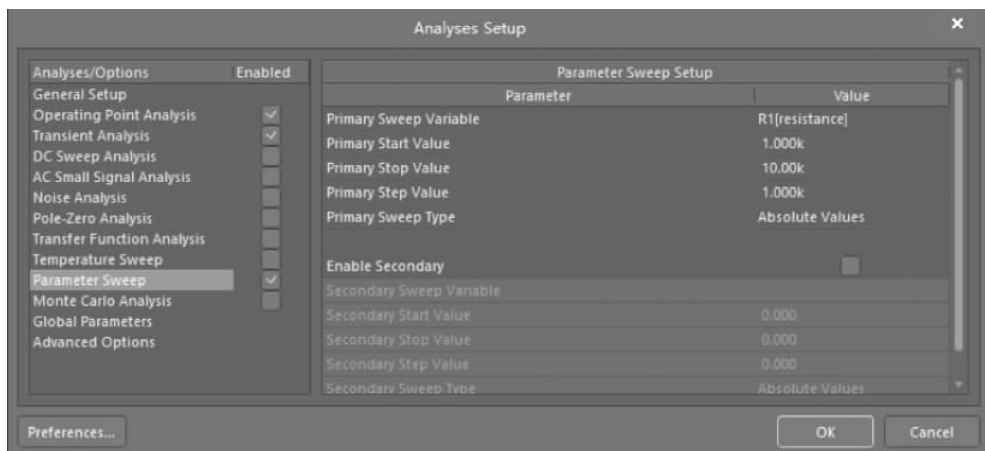


图 3-46 设置仿真参数界面 2

- ① Primary Sweep Variable: R1[resistance]。
 - ② Primary Start Value: 1.000k。
 - ③ Primary Stop Value: 10.000k。
 - ④ Primary Step Value: 1.000k。
 - ⑤ Primary Sweep Type: Absolute Values。
 - ⑥ 其他按默认参数设置。
- (4) 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,运行仿真。

3.5.3 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。在该文件下有两个标签。其中一个是 Operating Point,另一个是 Transient Analysis。单击 Transient Analysis 标签。
- (3) 如果没有波形出现,则在该文件的图形界面内单击鼠标右键,出现快捷菜单,选择 Add Wave To Plot。
- (4) 出现图 3-47 所示的选择添加波形对话框。依次选择 in、out、out_p01、out_p02、out_p03、out_p04、out_p05、out_p06、out_p07、out_p08、out_p09、out_p10,并依次单击 Create 按钮,直到将所有波形添加到波形图界面中。

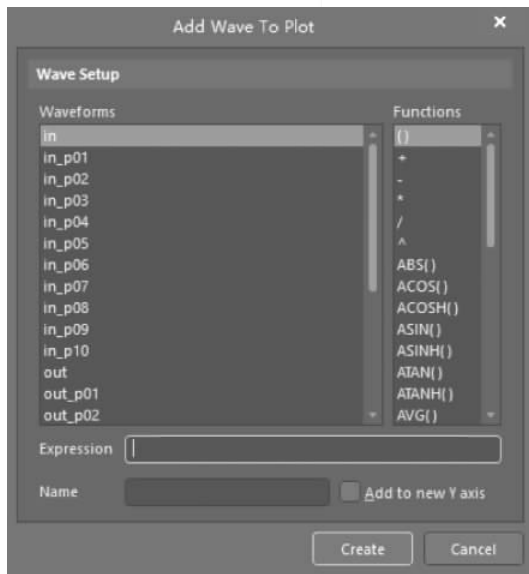


图 3-47 添加波形界面

其中,out_pxx 表示在 R1 从 1k Ω 到 10k Ω 变化的过程中输出的变化情况。

- (5) 添加完成后,如图 3-48 所示,可以看出输出的变化情况。
- (6) 保存工程文件,并退出设计工程。

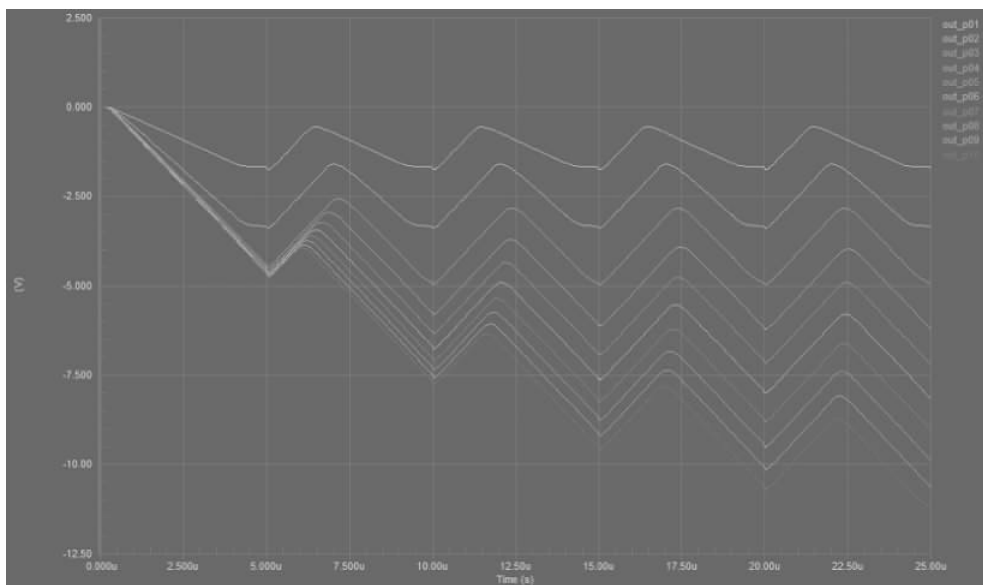


图 3-48 添加所有输出波形后的界面

3.6 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。主要内容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。

3.6.1 建立新的傅里叶分析工程

下面首先给出建立新的傅里叶分析电路工程的步骤。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,打开 AD 软件。
- (2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,创建一个名字为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程。
- (3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名字为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.6.2 构建傅里叶分析电路

下面构建傅里叶分析电路。其步骤主要包括:

- (1) 从 Miscellaneous Devices.IntLib 库中分别找到名字为 Res1 的电阻元器件、名字为 Cap 的电容元器件、名字为 NPN 的晶体管(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将其按照图 3-49 所示的位置进行放置。
- (2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名字为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按

照图 3-49 所示的位置进行放置。

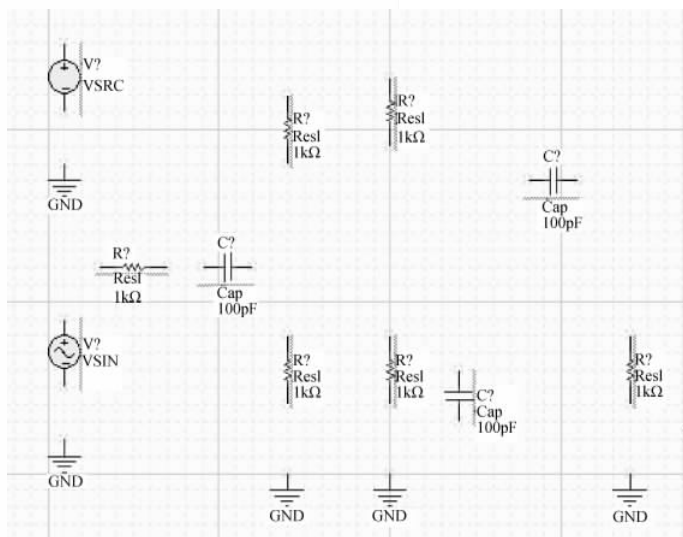


图 3-49 放置元件和信号源

(3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-49 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-50 所示的方式进行连接。

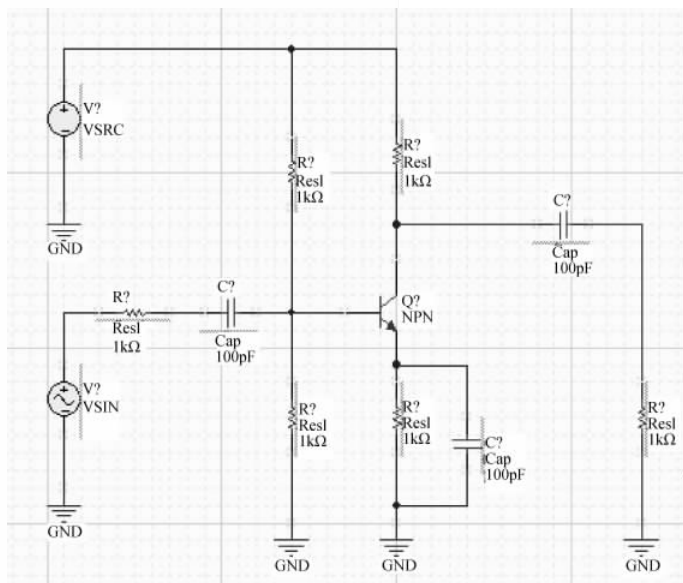


图 3-50 连接电路元件和信号源

(5) 按照前面所介绍的为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 3-51 给出分配完标识符后的原理图界面。

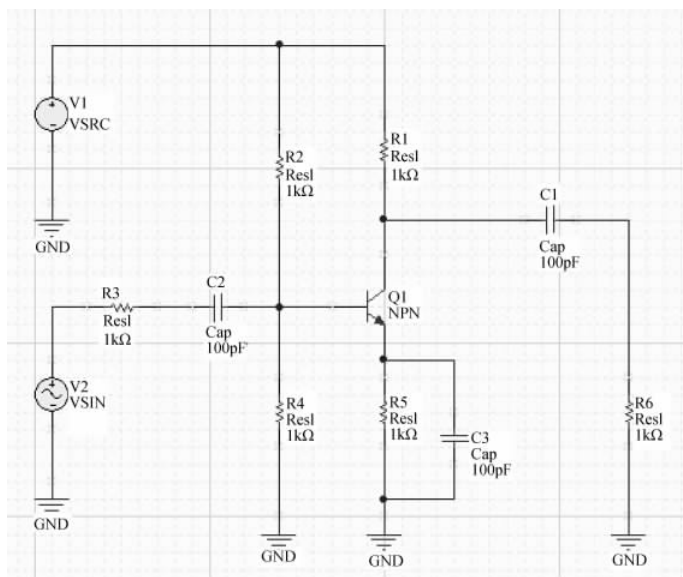


图 3-51 为电路元件和信号源分配唯一的标识符

(6) 在如图 3-51 所示的电路中,按照前面的方法,将 V1 直流电源设置为 +12V。按图 3-52 所示,设置 V2 信号源,其参数设置为:



图 3-52 为 V2 信号源设置属性

① Amplitude: 0.1,并选中右侧的复选框。

② Frequency: 10kΩ,并选中右侧的复选框。

(7) 按照图 3-53 所示,将电阻和电容值改成相应的值。

(8) 为了观察方便,如图 3-53 所示,在放大器的输入和输出端分别放置名字为 IN 和 OUT 的网络标号。

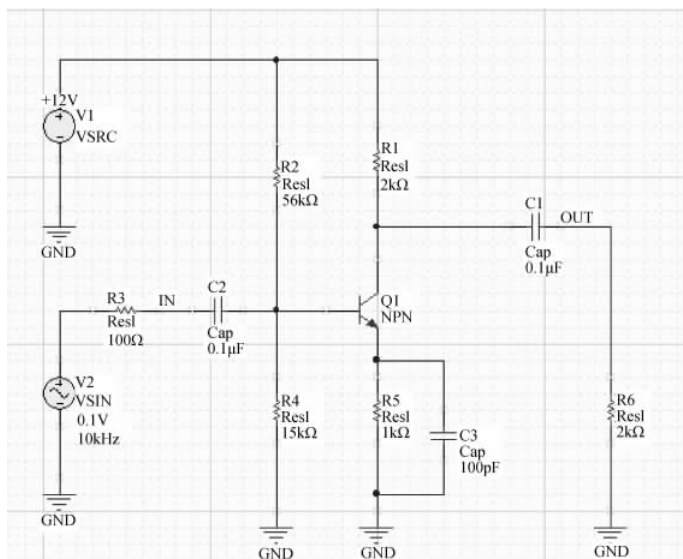


图 3-53 修改电路元件参数

(9) 保存设计,将其保存到 fourier_analysis 目录。

3.6.3 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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。
- (2) 打开如图 3-54 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置:

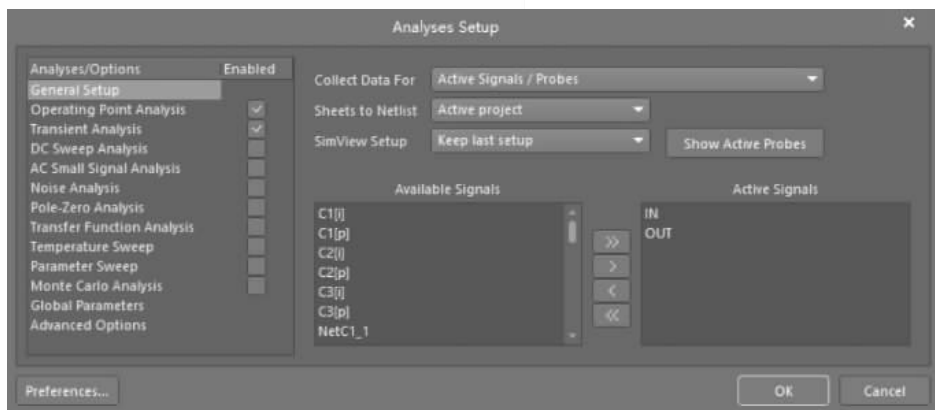


图 3-54 设置仿真参数界面 1

① 选中 Operating Point Analysis 和 Transient Analysis 选项,执行直流工作点和瞬态分析功能。

② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。

③ 将 IN 和 OUT 添加到 Active Signals 栏中。

(3) 选择 Transient Analysis 选项,出现如图 3-55 所示的 Transient Analysis Setup(瞬态分析设置)对话框。按下面参数设置:

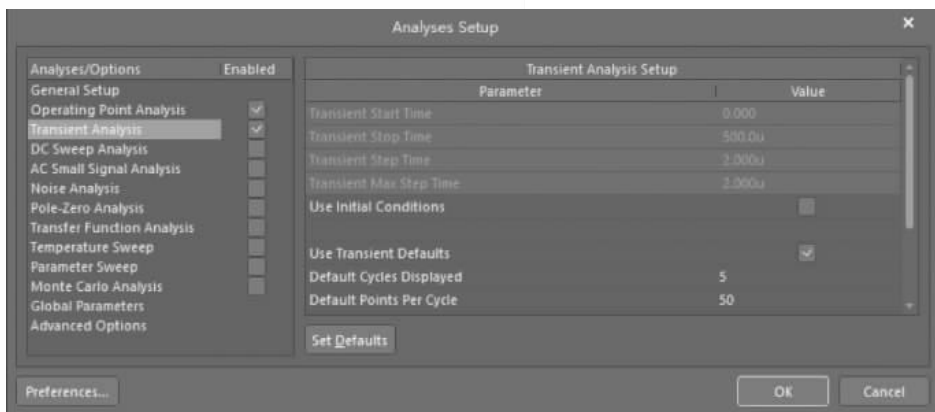


图 3-55 设置仿真参数界面 2

① 选中 Use Transient Defaults。

② 选中 Enable Fourier。

- ③ 其他按默认参数设置。
- (4) 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,运行仿真。

3.6.4 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,如图 3-56 所示,在该文件下有三个标签: Operating Point、Transient Analysis 和 Fourier Analysis,单击 Fourier Analysis 标签。



图 3-56 单击 Fourier Analysis 标签

- (3) 看到如图 3-57 所示的傅里叶分析的结果。

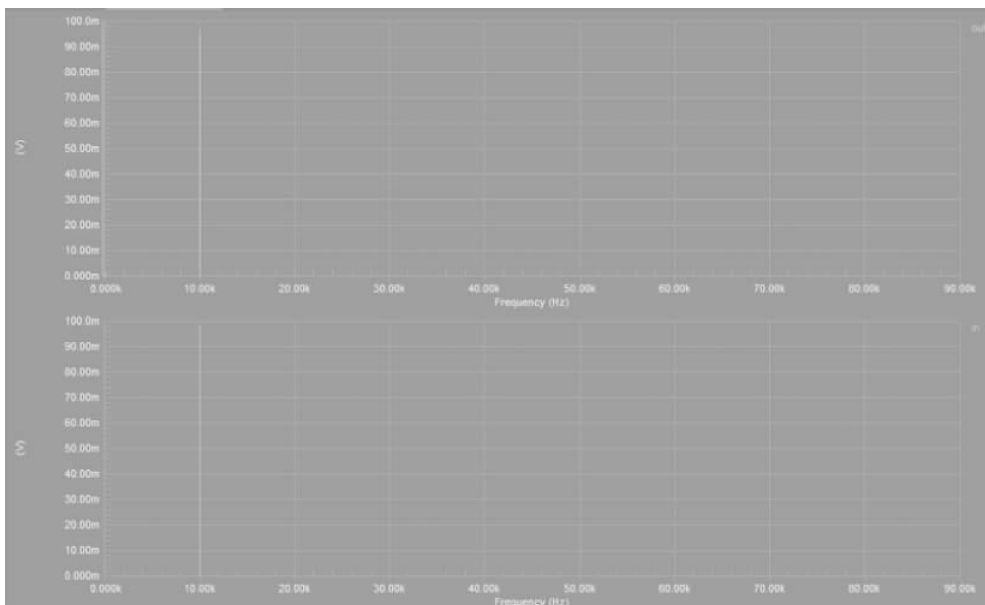


图 3-57 傅里叶分析结果

- (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 3-58 给出了瞬态分析结果。

3.6.5 修改电路参数重新执行傅里叶分析

下面修改电路参数并重新执行傅里叶分析。其步骤主要包括:

- (1) 将图 3-53 中的 R4 的值改成 56K,重新执行傅里叶分析。
- (2) 看到如图 3-59 所示的傅里叶分析的结果,很明显发生失真。

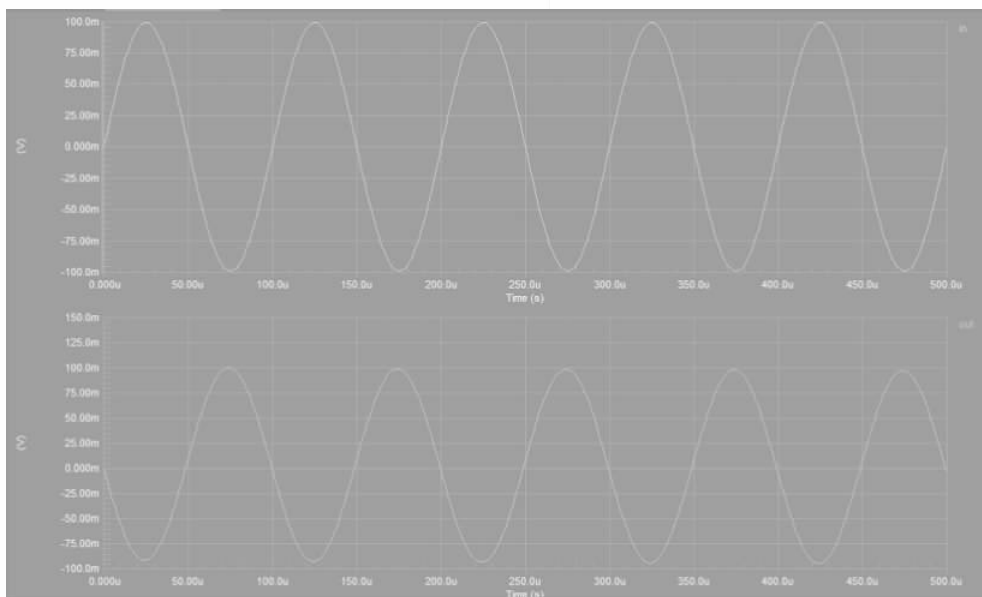


图 3-58 瞬态分析结果

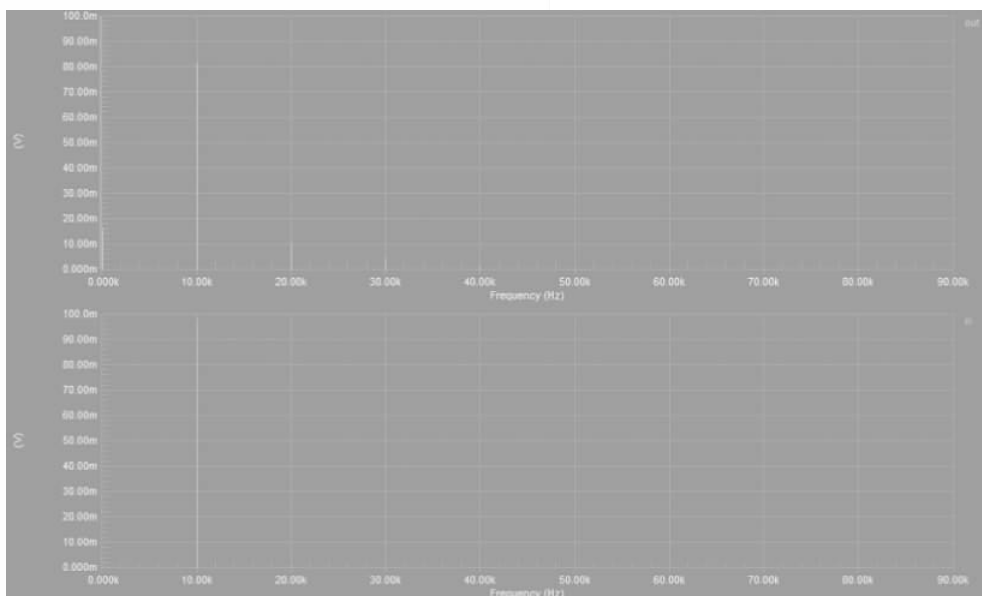


图 3-59 傅里叶分析结果

(3) 图 3-60 给出了瞬态分析结果。

(4) 如图 3-61 所示,单击 PCB_Project1.sim 标签,打开 PCB_Project1.sim 文件。

该文件给出了所对应的 IN 和 OUT 节点基波和 10 次谐波的幅度和相位的大小,以及所得到的总谐波失真 THD 的详细信息,如图 3-62 所示。

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

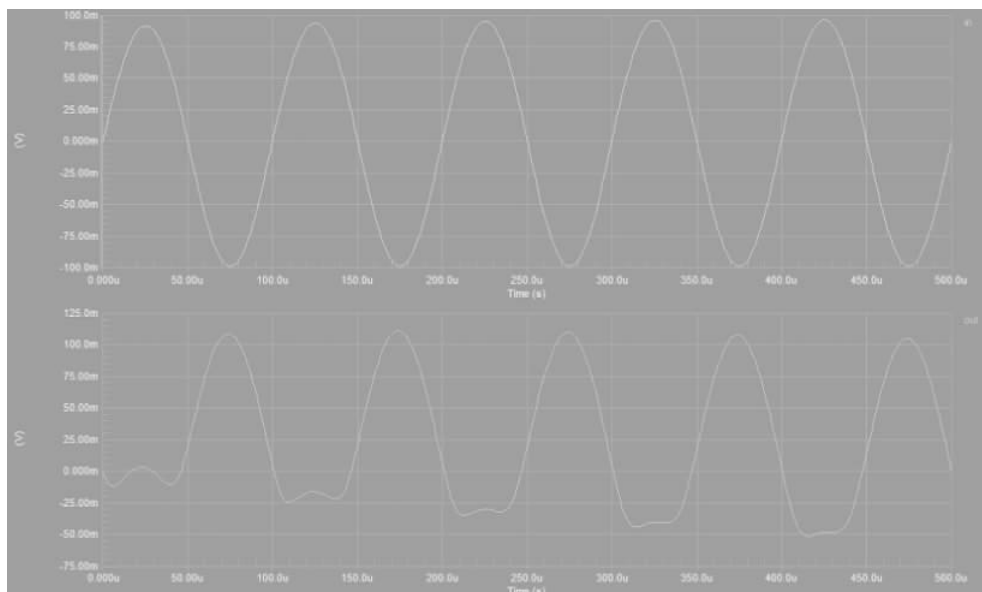


图 3-60 瞬态分析结果



图 3-61 选择 sim 文件

Fourier analysis for out:					
No. Harmonics: 10, THD: 14.205 %, Gridsize: 200, Interpolation Degree: 1					
Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
0	0.00000E+000	1.64779E-002	0.00000E+000	0.00000E+000	0.00000E+000
1	1.00000E+004	8.18443E-002	-1.75731E+002	1.00000E+000	0.00000E+000
2	2.00000E+004	1.03504E-002	-8.61028E+001	1.26465E-001	8.96285E+001
3	3.00000E+004	4.99423E-003	-1.74355E+002	6.10211E-002	1.37648E+000
4	4.00000E+004	1.67077E-003	9.39865E+001	2.04140E-002	2.69728E+002
5	5.00000E+004	1.93741E-004	3.14008E+001	2.36719E-003	2.07132E+002
6	6.00000E+004	3.66864E-004	7.37336E+001	4.48246E-003	2.49465E+002
7	7.00000E+004	3.06491E-004	1.12792E+001	3.74481E-003	1.87011E+002
8	8.00000E+004	1.21058E-004	-1.15133E+000	1.47912E-003	1.74580E+002
9	9.00000E+004	1.31975E-004	6.93697E+000	1.61252E-003	1.82668E+002

Fourier analysis for in:					
No. Harmonics: 10, THD: 1.07624 %, Gridsize: 200, Interpolation Degree: 1					
Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
0	0.00000E+000	-1.57866E-004	0.00000E+000	0.00000E+000	0.00000E+000
1	1.00000E+004	9.80649E-002	-3.70074E-002	1.00000E+000	0.00000E+000
2	2.00000E+004	9.30441E-004	9.46975E+001	9.48801E-003	9.47345E+001
3	3.00000E+004	4.73192E-004	7.46072E+000	4.82529E-003	7.49773E+000
4	4.00000E+004	1.51463E-004	-7.78498E+001	1.54452E-003	-7.78129E+001
5	5.00000E+004	7.91552E-006	-9.35753E+001	8.07171E-005	-9.35382E+001
6	6.00000E+004	3.06561E-005	-8.43197E+001	3.12611E-004	-8.42827E+001
7	7.00000E+004	1.74192E-005	-1.65304E+002	1.77629E-004	-1.65267E+002
8	8.00000E+004	2.41869E-006	1.46366E+002	2.46642E-005	1.46403E+002
9	9.00000E+004	3.91151E-006	-1.75185E+002	3.98869E-005	-1.75148E+002

图 3-62 傅里叶分析的其他信息

3.7 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 给出了不同元器件所产生的噪声列表。

表 3-1 不同元器件相关的噪声

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

续表

器件类型	噪声类型(V^2/Hz)	含 义
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 $K_f \cdot (I_{af}/f^6)$ 成正比。② 散射噪声: 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 $V(ONoise)/\text{增益}$ 得到。

3.7.1 建立新的噪声分析工程

下面首先给出建立新的噪声分析电路工程的步骤。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, 打开 AD 软件。

(2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project, 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。

3.7.2 构建噪声分析电路

下面构建噪声分析电路。其步骤主要包括:

(1) 从 Miscellaneous Devices.IntLib 库中分别找到名字为 Res1 的电阻元器件、名字为 Cap 的电容元器件、名字为 QNPN 的晶体管(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件), 并将其按照图 3-63 所示的位置进行放置。

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。

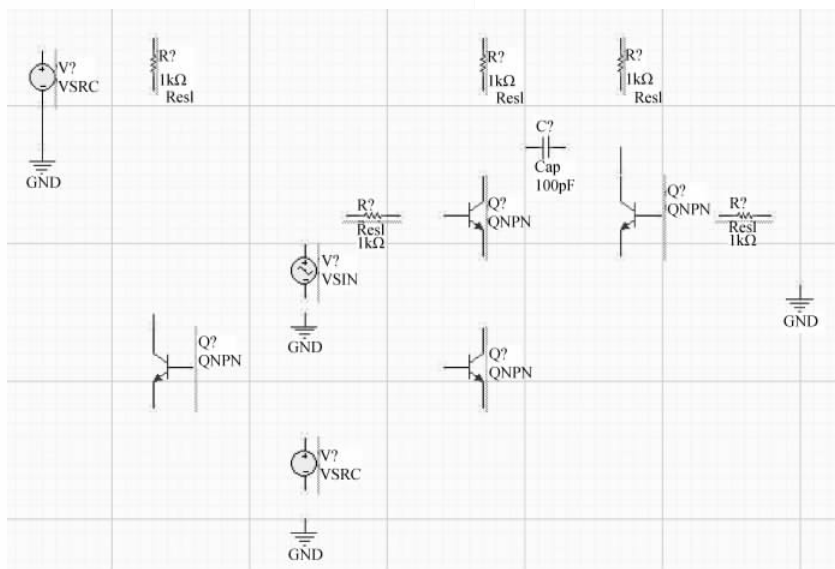


图 3-63 仿真元件和信号源

② 如图 3-64 所示,在该界面下选中 Mirrored 复选框,则可以镜像放置晶体管。

(2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名字为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按照图 3-63 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-63 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-65 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 3-66 给出分配完标识符后的原理图界面。

(6) 如图 3-67 所示,将 V1 和 V3 分别设置为 +12V 和 -12V。其他元器件参数按图 3-67 所示进行设置。

(7) 为了方便对仿真结果的分析,如图 3-67 所示,在电容 C1 的两端分别放置名字为 OUT1 和 OUT2 的网络标号。

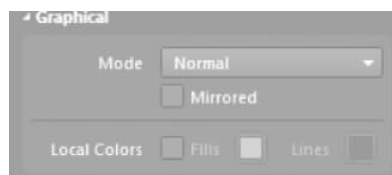


图 3-64 镜像放置晶体管

3.7.3 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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。

(2) 打开如图 3-68 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置:

① 选中 Operating Point Analysis 和 Noise Analysis 选项,执行直流工作点和噪声分析功能。

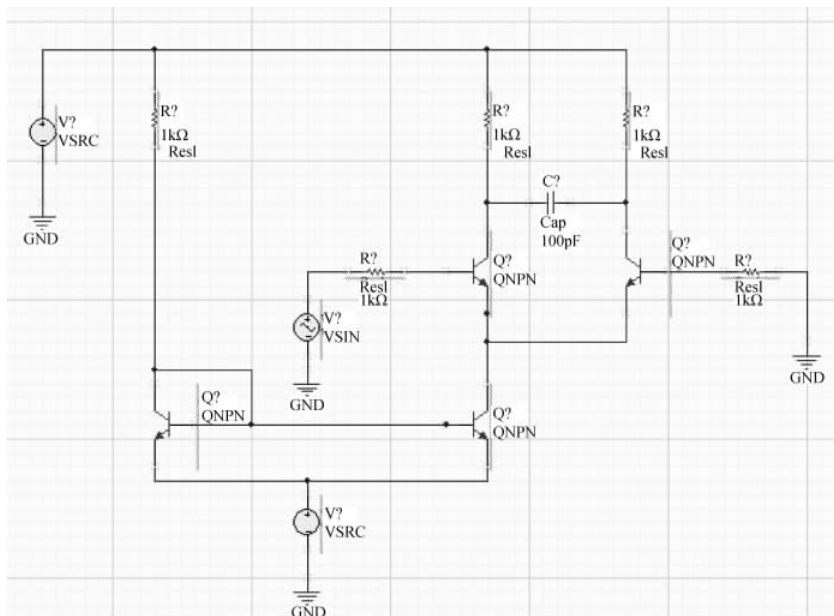


图 3-65 连接电路元件和信号源

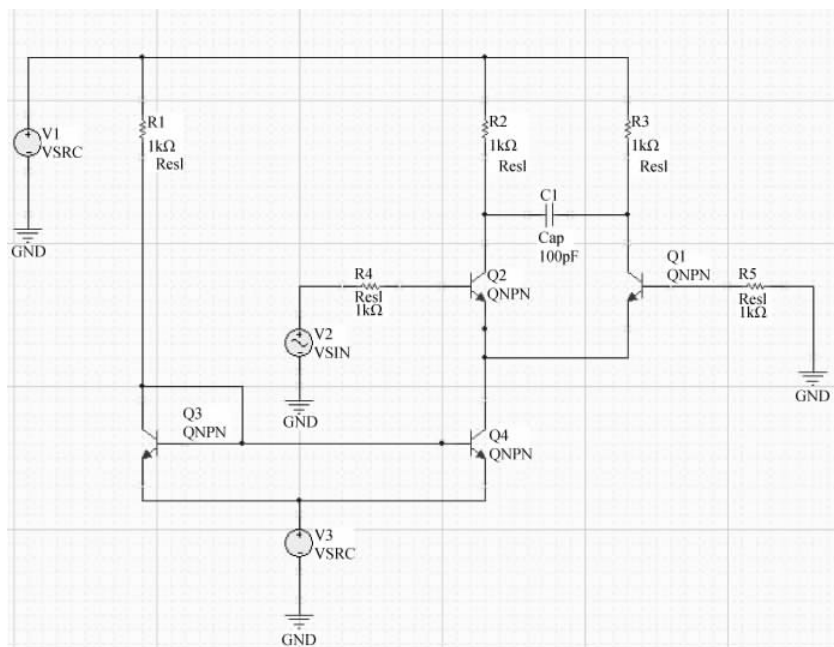


图 3-66 为电路元件和信号源分配唯一的标识符

② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。

③ 将 OUT1 和 OUT2 添加到 Active Signals 栏中。

(3) 选择 Noise Analysis 选项, 出现如图 3-69 所示 Noise Analysis Setup(噪声分析设置)界面。按下面参数设置:

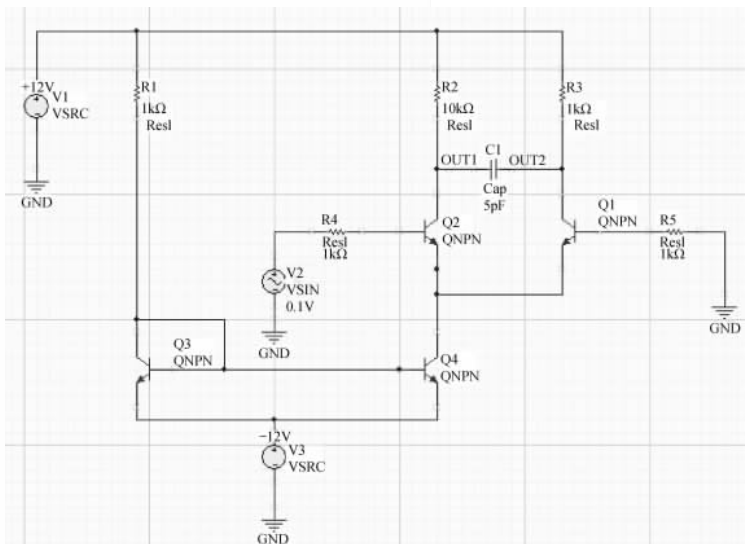


图 3-67 修改电路元器件参数

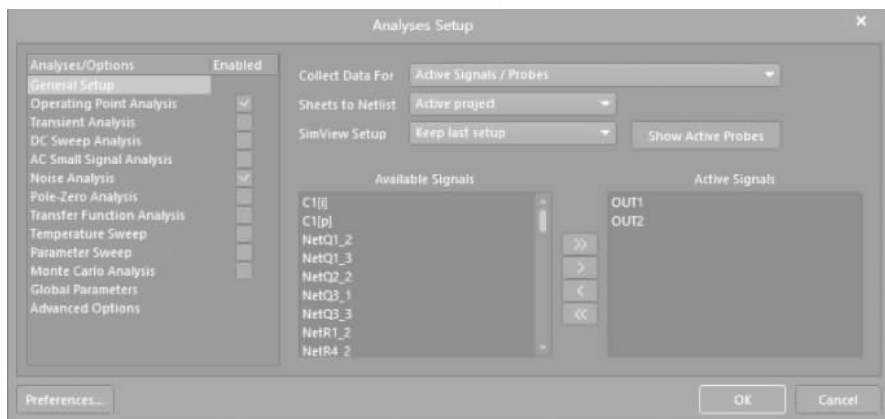


图 3-68 设置仿真参数界面 1

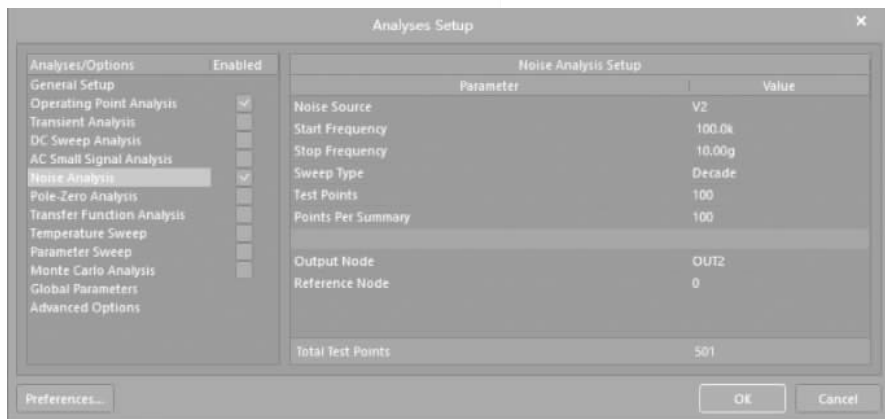


图 3-69 设置仿真参数界面 2

- ① Noise Source(噪声源): V2。
 - ② Start Frequency(起始频率): 100.0k。
 - ③ Stop Frequency(截止频率): 10.00g。
 - ④ Sweep Type(扫描类型): Decade。
 - ⑤ Output Node(输出节点): OUT2。
 - ⑥ 其他按默认参数设置。
- (4) 单击 OK 按钮,退出分析设置界面,运行仿真。

3.7.4 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。如图 3-70 所示,在该文件下有两个标签,一个是 Operating Point,另一个是 Noise Spectral Density(噪声谱密度),单击 Noise Spectral Density 标签。



图 3-70 选择 Noise Spectral Density

- (3) 可以看到如图 3-71 所示的噪声谱密度分布图。

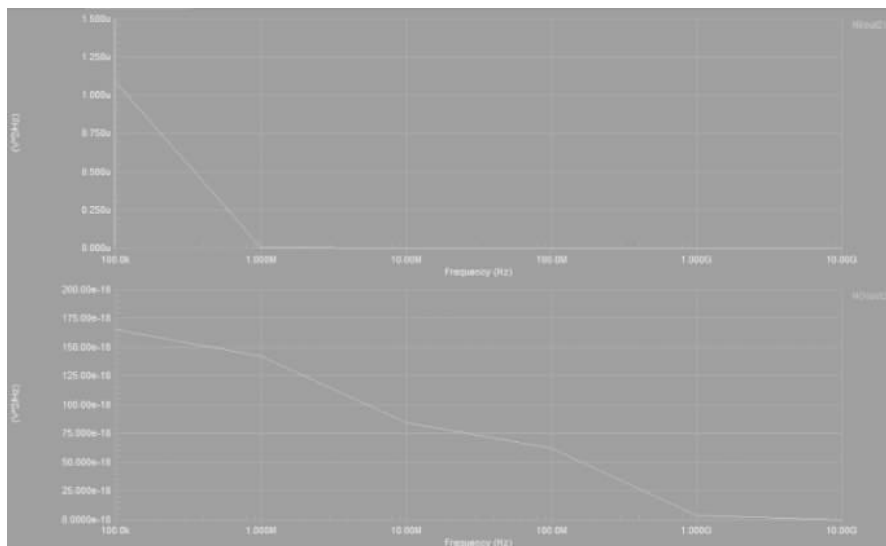


图 3-71 噪声谱密度分布

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

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

下面首先给出建立新的温度分析电路工程的步骤。其步骤主要包括：

(1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角下,选择【开始】→Altium Designer,打开 AD 软件。

(2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,创建一个名字为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程。

(3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名字为 Sheet1.SchDoc 的原理图文件。

3.8.2 构建温度分析电路

下面构建温度分析电路。其步骤主要包括：

(1) 从 Miscellaneous Devices, IntLib 库中分别找到名字为 Res1 的电阻元器件、名字为 Res Tap 的可变电阻、名字为 Diode 1N4148 的二极管、名字为 Diode 18TQ045 的二极管、名字为 Op Amp 的运算放大器(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将其按照图 3-72 所示的位置进行放置。

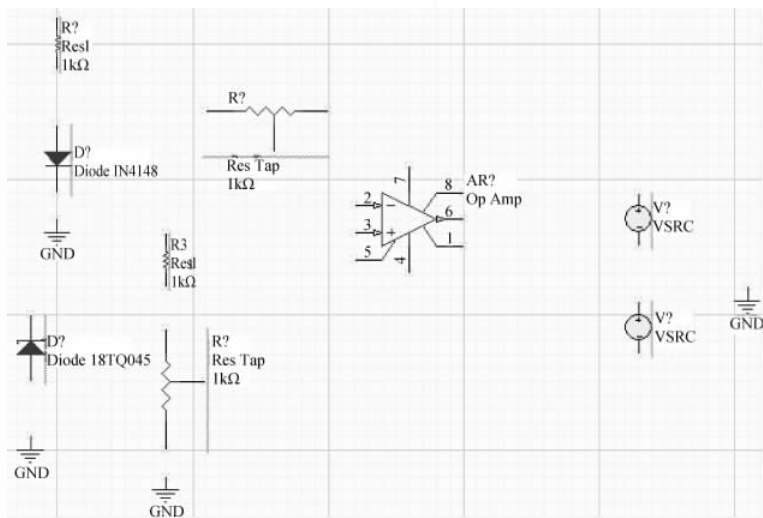


图 3-72 放置元器件和信号源

(2) 从 Simulation Sources, IntLib 库中找到名字为 VSRC 的元器件,并按照图 3-72 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-72 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-73 所示的方式进行连接。

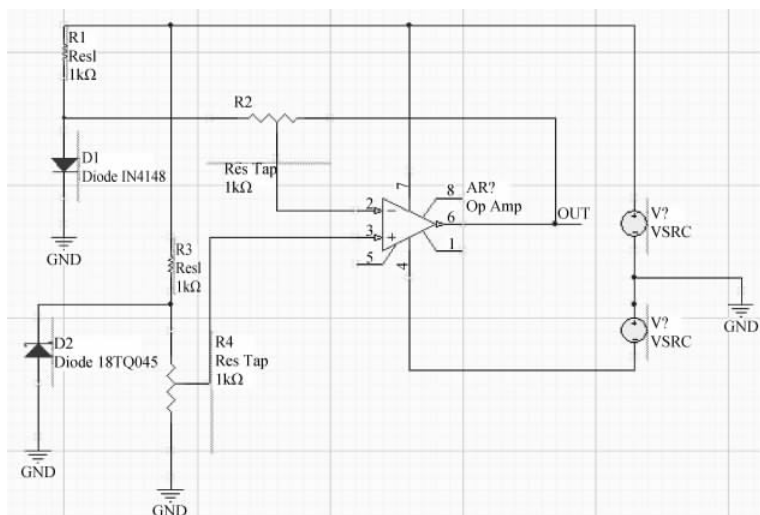


图 3-73 连接电路元器件和信号源

(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 3-74 给出分配完标识符后的原理图界面。

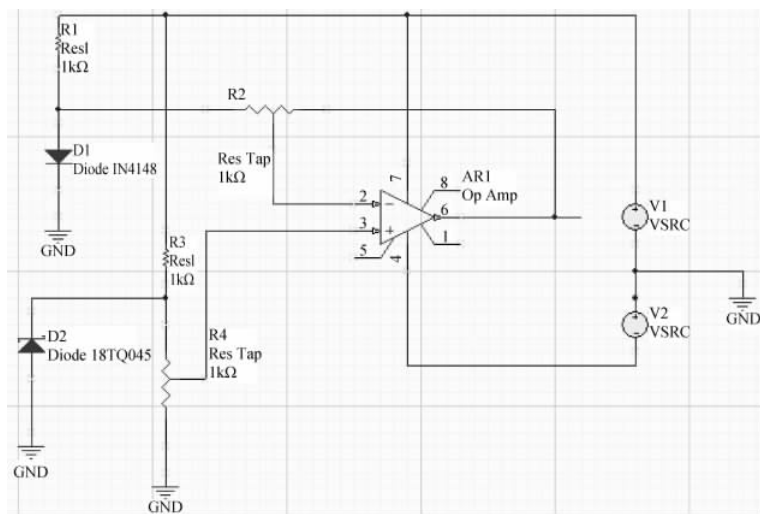


图 3-74 为电路元器件和信号源分配唯一的标识

(6) 如图 3-75 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 3-75 所示,在放大器的输出端放置名字为 OUT 的网络标号。

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

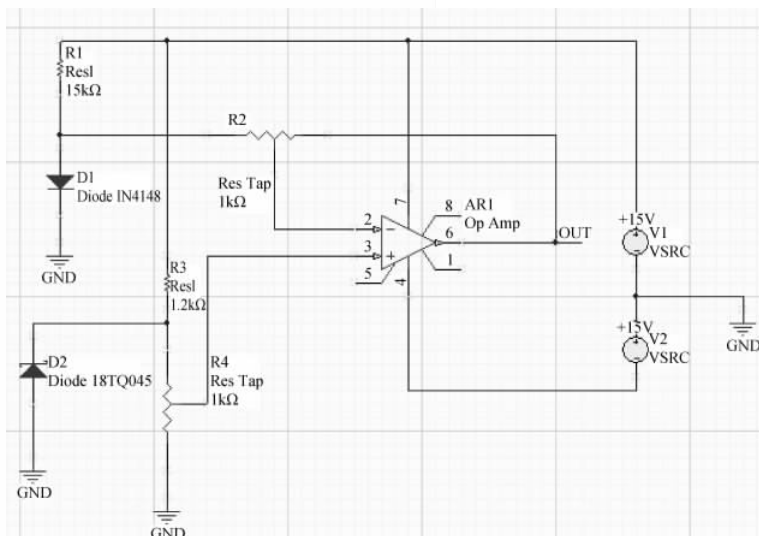


图 3-75 修改电路元器件参数

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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。

(2) 打开如图 3-76 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面,按下面参数设置：

① 选中 Transient Analysis 和 Temperature Sweep 选项,执行暂态分析和温度扫描分析功能。

② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。

③ 将 OUT 添加到 Active Signals 栏中。

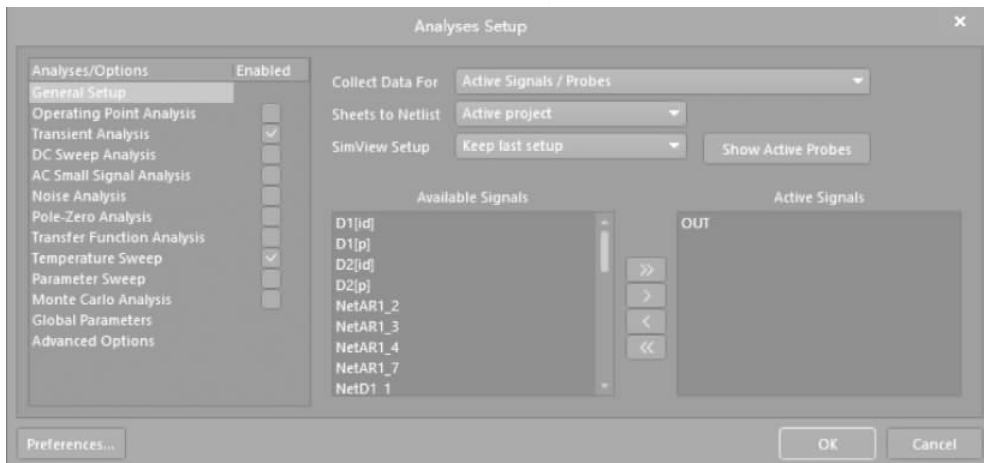


图 3-76 设置仿真参数界面 1

(3) 选择 Temperature Sweep,出现如图 3-77 所示的 Temperature Sweep Setup(温度扫描设置)界面。按下面参数设置：

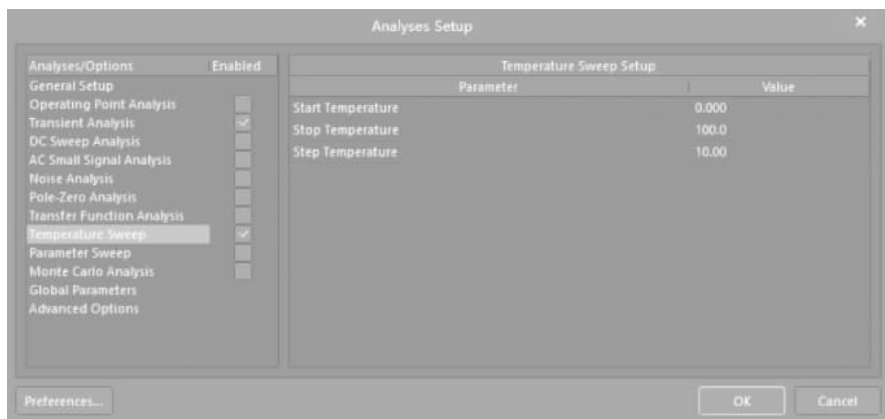


图 3-77 设置仿真参数界面 2

- ① Start Temperature(起始温度): 0.000。
- ② Stop Temperature(终止温度): 100.0。
- ③ Step Temperature(步长温度): 10.00。
- ④ 其他按默认参数设置。
- (4) 单击 OK 按钮,退出设置界面,运行仿真。

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。在该文件下有一个 Transient Analysis 标签。单击该标签。
- (3) 如图 3-78 所示,给出了温度扫描的结果。

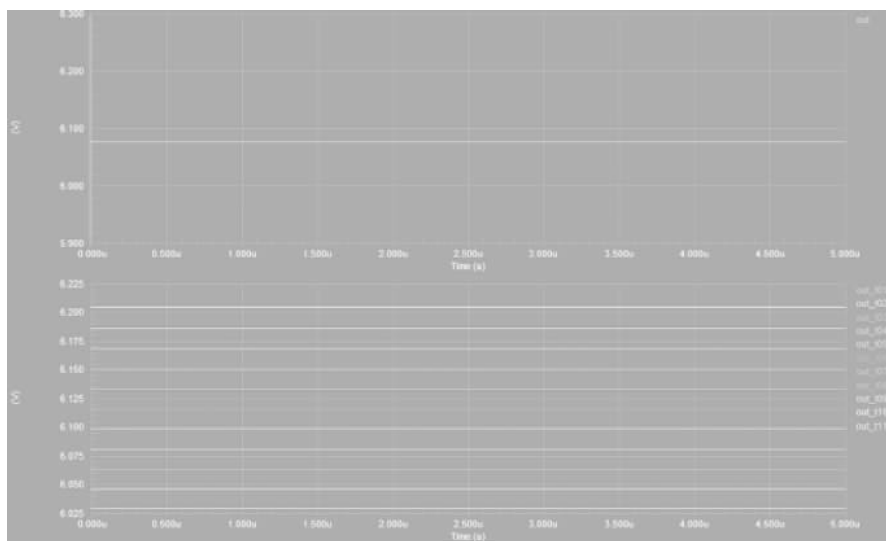


图 3-78 温度扫描仿真结果

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

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,主要内容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

下面首先给出建立新的蒙特卡洛分析电路工程的步骤。其步骤主要包括:

(1) 在 Windows 10 操作系统主界面的左下角下,选择【开始】→Altium Designer,打开 AD 软件。

(2) 在 AD 主界面主菜单下选择 New→Project→PCB Project,创建一个名字为 PCB_Project1.PrjPCB 的新工程。

(3) 按照前面所介绍的添加原理图的方法,添加名字为 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,并执行蒙特卡洛分析。其步骤主要包括:

(1) 从 Miscellaneous Devices.IntLib 库中分别找到名字为 Res1 的电阻元器件、名字为 Cap 的电容元器件、名字为 2N3904 的晶体管(必须选择 Model Type 为 Simulation 的元器件),并将其按照图 3-79 所示的位置进行放置。

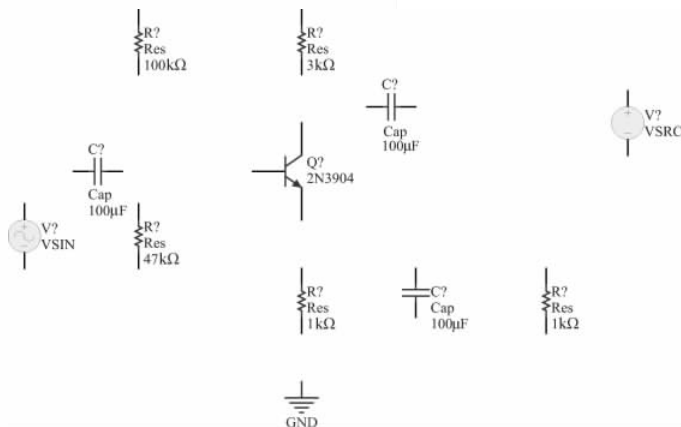


图 3-79 放置元器件和信号源

(2) 从 Simulation Sources.IntLib 库中找到名字为 VSRC 和 VSIN 的元器件,并按照图 3-79 所示的位置进行放置。

(3) 单击 AD 主界面下工具栏内的  按钮,将 GND 按照图 3-79 所示的位置进行放置。

(4) 单击 AD 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 3-80 所示的方式进行连接。

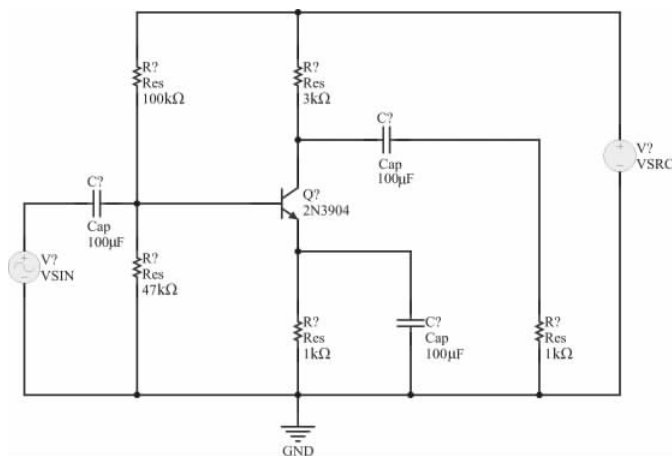


图 3-80 连接电路元器件和信号源

(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 3-81 给出分配完标识符后的原理图界面。

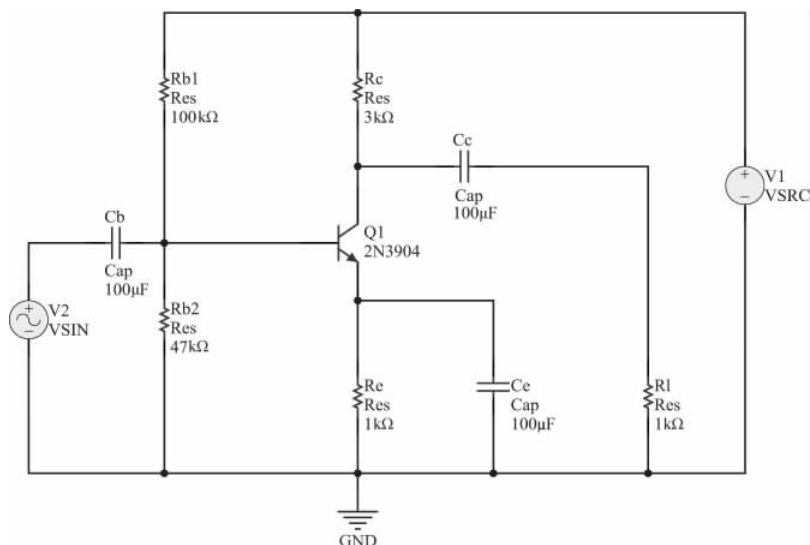


图 3-81 为电路元器件和信号源分配唯一的标识符

(6) 如图 3-82 所示,将元器件参数按图中设置。

(7) 为了方便对仿真结果的分析,按图 3-82 所示的电路,在电容 Cc 的输出端放置名

字为 OUT 的网络标号。

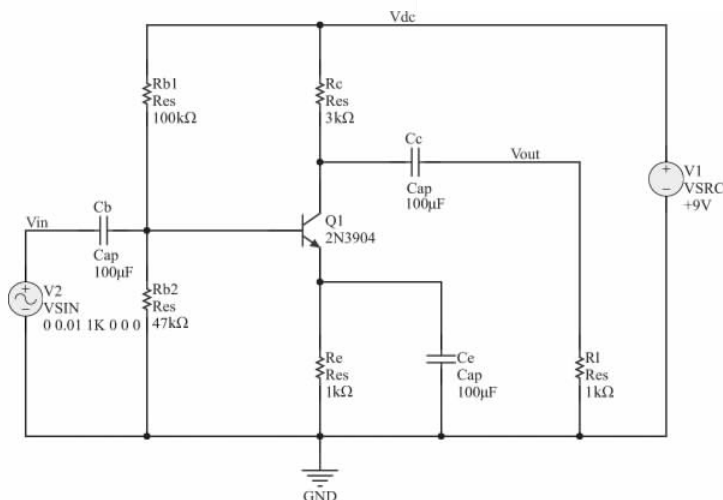


图 3-82 修改电路元器件参数

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 主界面主菜单下选择 Design→Simulate→Mixed Sim。
- (2) 打开如图 3-83 所示的 Analyses Setup(分析设置)界面。按下面参数设置：

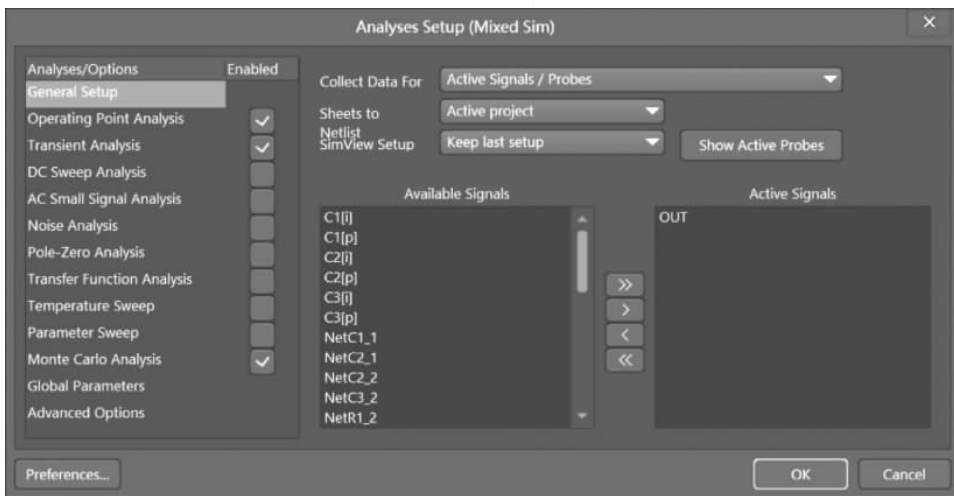


图 3-83 设置仿真参数界面 1

- ① 选中 Operating Point Analysis、Transient Analysis 和 Monte Carlo Analysis 选项,分别执行直流工作点、瞬态分析和蒙特卡洛功能。
- ② 将 Collect Data For 设置为 Active Signals/Probes。
- ③ 将 OUT 添加到 Active Signals 栏中。

(3) 选择 Transient Analysis 选项, 出现如图 3-84 所示的 Transient Analysis Setup (瞬态分析设置) 界面, 接受默认设置参数。

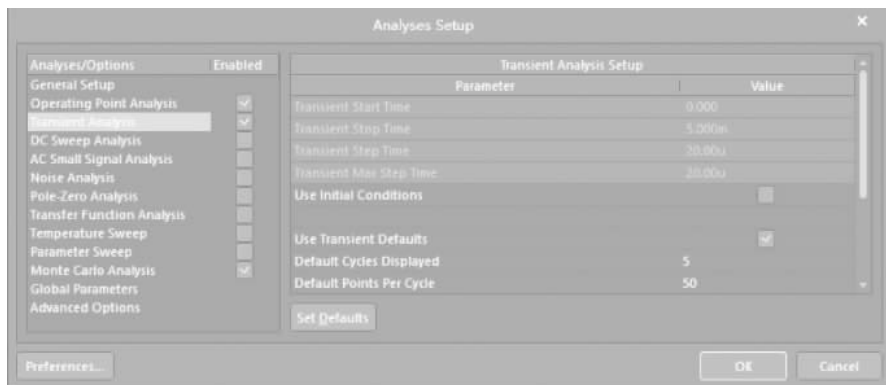


图 3-84 设置仿真参数界面 2

(4) 选择 Monte Carlo Analysis 选项, 出现如图 3-85 所示的 Monte Carlo Analysis Setup (蒙特卡洛分析设置) 界面。按下面参数设置:

- ① Seed(种子): 32767。
- ② Distribution(分布): Uniform。
- ③ Number of Runs(运行次数): 30。
- ④ 将所有的 Tolerance(容差)设置为 10%。



图 3-85 设置仿真参数界面 3

(5) 单击 OK 按钮, 退出分析设置界面, 运行仿真。

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。在该文件下有一个 Transient Analysis 标签,单击该标签。

(3) 如图 3-86 所示,给出了蒙特卡洛分析的结果。

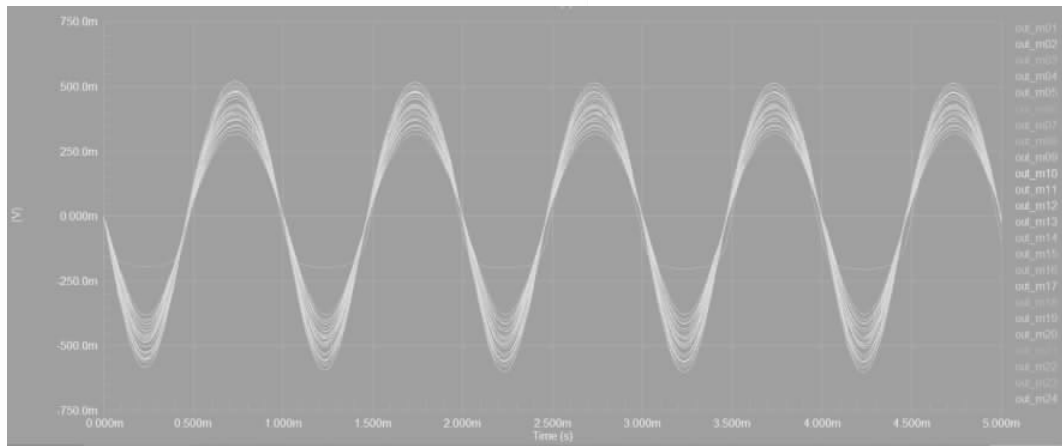


图 3-86 蒙特卡洛分析结果

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