

第 3 章

CHAPTER 3

高频电子线路仿真与设计

本章引入虚拟仿真软件,完善高频电子线路的实验。虚拟仿真实验突破时间、空间限制,而且能观察更多的节点电压、电流波形。在简要介绍仿真软件的基础上,介绍了与第 2 章单元功能电路对应的电路仿真实验。

3.1 软件简介

3.1.1 概述

LTspice 是一款高性能 SPICE 仿真软件、原理图采集和波形查看器,集成增强功能和模型,简化了模拟电路的仿真。宏模型也包括在 LTspice 下载中,适用于大多数 ADI 开关稳压器、放大器以及用于通用电路仿真的器件库。

ADI 公司官方网站提供最新版本的 LTspice 仿真软件,在官方网站检索 LTspice 即可找到 LTspice 下载界面。软件下载界面如图 3.1.1 所示。



图 3.1.1 LTspice 下载界面

3.1.2 界面介绍

安装完成之后,启动 LTspice 后,如图 3.1.2 所示,界面分为四个区域,分别是菜单栏、工具栏、操作区、状态栏。

菜单栏：刚启动的菜单栏只有 File、View、Tools、Help 四个菜单项，如图 3.1.2 所示。

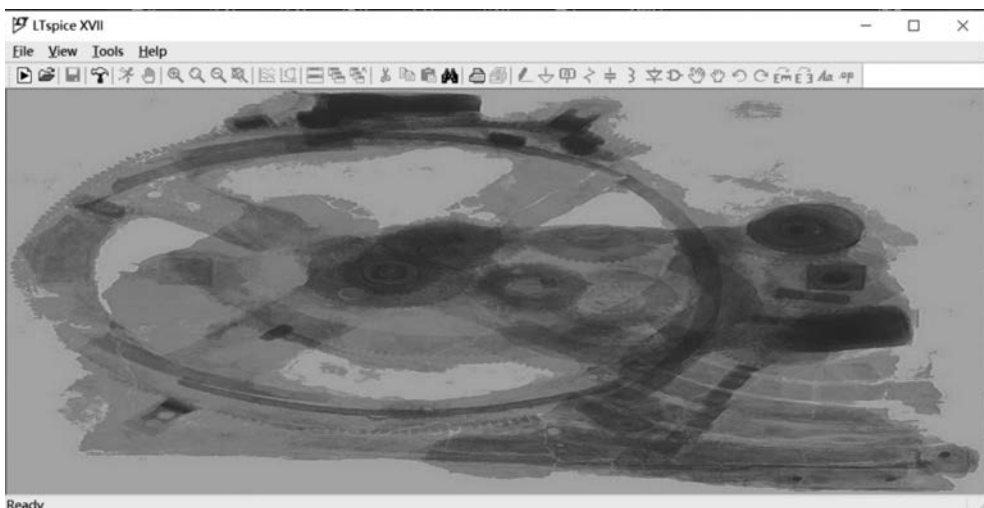


图 3.1.2 LTspice 启动窗口

工具栏：只有创建新的设计，才能激活大部分工具栏图标，当图标为灰色时，该工具在当前状态下不能使用，如图 3.1.3 所示。



图 3.1.3 LTspice 工具栏

操作区：在创建电路绘制窗口、电路符号设计窗口之后才能使用。

状态栏：在电路绘制窗口，将显示光标所在位置的器件或网络名称。在执行仿真之后的波形显示窗口，状态栏将显示光标所在位置的横坐标、纵坐标信息。

3.1.3 电路绘制

绘制电路图时注意以下原则：

- (1) 至少需要一个 GND(节点名=0)。
- (2) 节点只有 GND 的电路，不能进行仿真。
- (3) 不可并联没有内阻的电压源，即使有相同的电压值，也不可并联。
- (4) 在没有分路的闭合电路网中，不能串联电流源。即使有相同的电流值，也不可串联。

绘制电路图。

第一步：创建新的电路设计图。选择 File→New Schematic→New Schematic 菜单命令（快捷键为 Ctrl+N），打开输入电路图用的空白板，默认设定为稍亮的灰色表格，如图 3.1.4 所示。也可单击工具栏的  图标。

第二步：添加器件。选择 Edit→Component 菜单命令（快捷键为 F2），打开 Select Component Symbol 的窗口，如图 3.1.5 所示，也可单击工具栏的  图标。打开器件库，如图 3.1.6 所示。常用无源器件，如电阻、电容、电感、二极管、地等可通过工具栏  的图标添加。

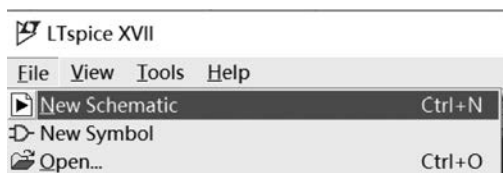


图 3.1.4 “New Schematic”的图标和按钮

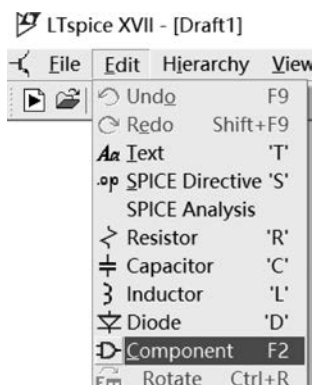


图 3.1.5 添加器件

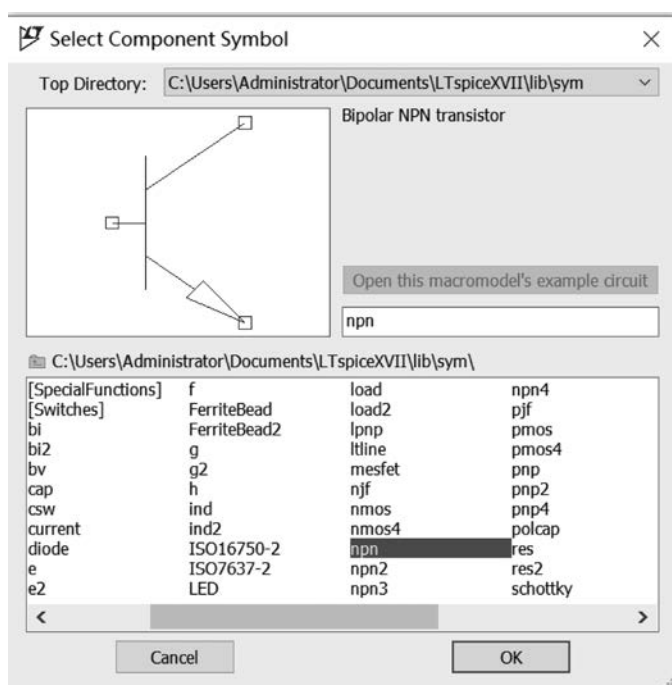


图 3.1.6 器件库

第三步：布局布线。根据设计的电路图，使用  图标挪动器件，放置相应的元件器到合适的位置，然后使用  图标连线。

第四步：选择器件类型和设置器件参数，如图 3.1.7 所示。右击待定电阻，出现电阻参数配置对话框，配置电阻值、误差、功率等参数，配置完成后单击 OK 按钮。单击 Select Capacitor 选项，进入图 3.1.8 所示的实体参数电阻型号选择对话框，查找所需型号。

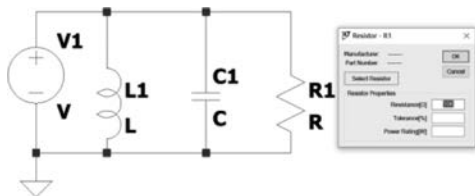


图 3.1.7 电阻参数配置

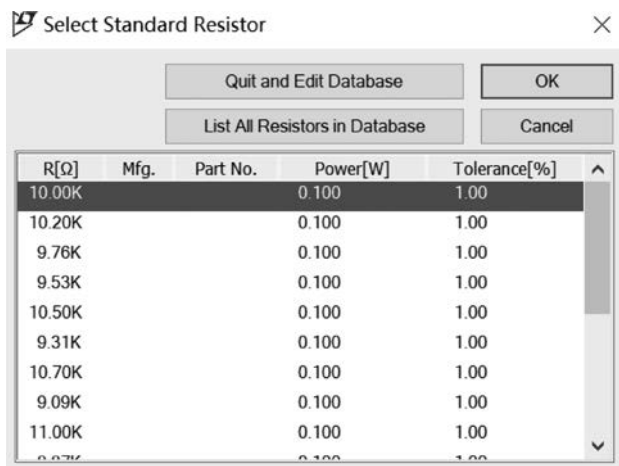


图 3.1.8 实体参数电阻型号选择

在电阻、电容、电感参数填写时,应注意单位的词头符号,在 LTspice 中不区分大小写字母,所以 10^6 使用 Meg 表示,如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 单位词头符号

符号	T	G	Meg	K	m	u	n	p	f
系数	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

3.1.4 激励配置

1. 直流信号

在电路图中右击电压源,将出现图 3.1.9 所示的直流性能配置对话框,包括以 V 为单位的直流电压,以 Ω 为单位的串联等效电阻。如图 3.1.10 所示,通过 advanced 选项,在对话框中进行更多参数配置。

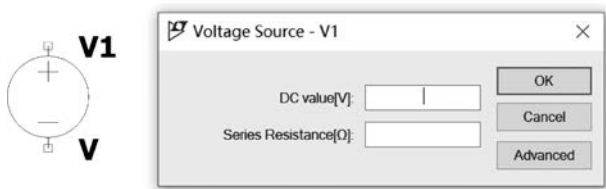


图 3.1.9 电源符号

2. 正弦波

正弦波设置: 在波形配置对话框中选择“SINE”,如图 3.1.11(a)所示,逐一配置“DC offset[V]”直流偏置电压、“Amplitude[V]”峰值电压、“Freq[Hz]”频率、“Tdelay[s]”起始工作到正弦波输出的时间、“Theta[1/s]”阻尼系数、“Phi[deg]”初始相位、“Ncycles”输出周期等参数。输出波形表达式为

$$V_{out} = V_{offset} + V_{amp} \sin\left(\frac{\pi \text{ phi}}{180^\circ}\right)$$

本例中,设置为直流偏置电压为 +1V,峰值为 1V,频率为 10kHz,其他参数没有设置。

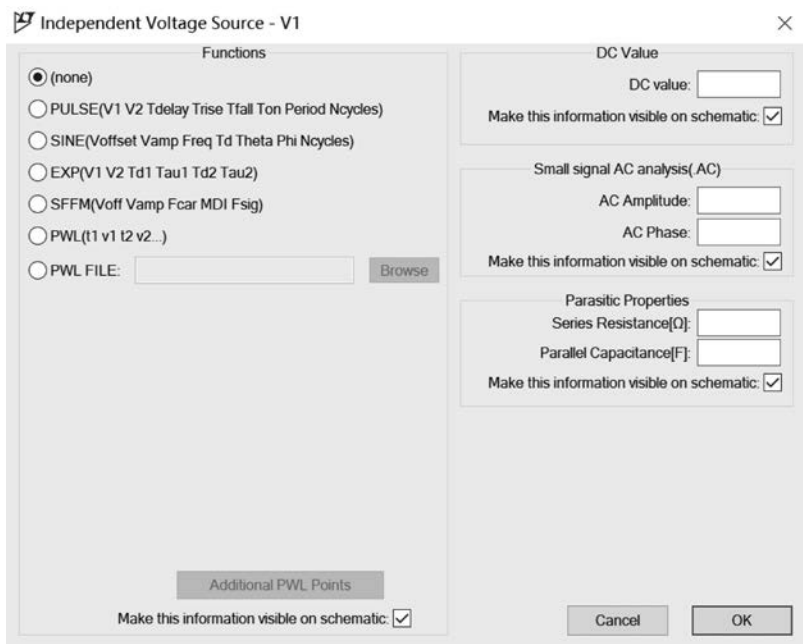
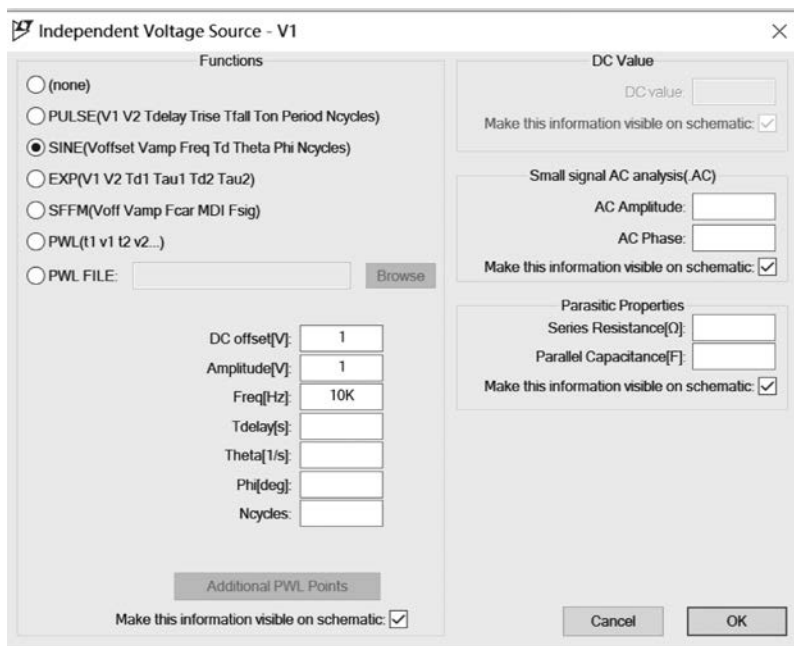


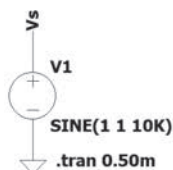
图 3.1.10 电源配置

设置仿真时间为 0.5ms,即输出 5 个周期的正弦波信号源参数显示顺序为 SIN(1 1 10K),如图 3.1.11(b)所示,配置完成的信号源产生频率 10kHz,直流偏置 1V,峰-峰值 2V 输出的正弦信号,如图 3.1.11(c)所示。

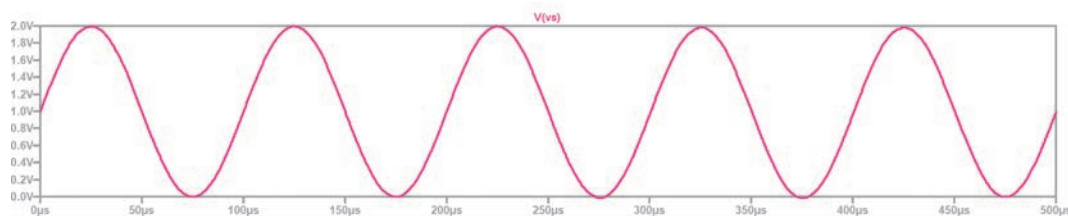


(a) 正弦配置对话框

图 3.1.11 正弦信号的配置及输出波形



(b) 正弦信号配置完成



(c) 正弦信号波形

图 3.1.11 (续)

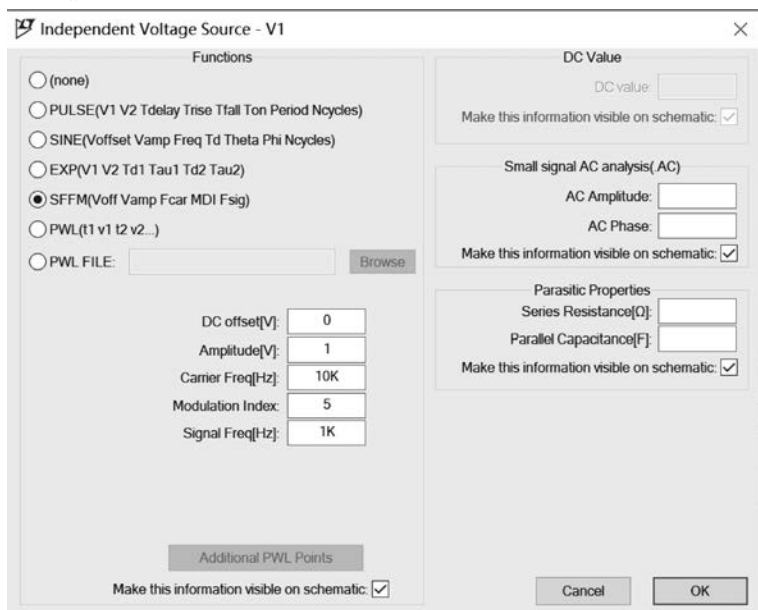
3. 单频调频波

单频调频波设置：在波形配置对话框选择为“SFFM”，如图 3.1.12(a)所示，逐一配置“DC offset[V]”直流偏置电压、“Amplitude[V]”峰值电压、“Carrier Freq[Hz]”载波频率、“Modulation index”调制指数、“Signal Freq[Hz]”调制频率等参数。输出波形表达式为

$$V_{\text{out}} = V_{\text{offset}} + V_{\text{amp}} \sin((2\pi F_{\text{car}} \text{time}) + \text{MDI} \sin(2\pi F_{\text{sig}} \text{time}))$$

式中，time 为时间变量， F_{car} 为载波频率，MDI 为调制指数， F_{sig} 为调制频率。

图 3.1.12(a) 示例中，偏置电压为 0V，峰值电压为 1V，载波频率为 10kHz，调制指数为 5，调制频率为 1kHz。信号源参数显示顺序为 SFFM(0 1 10K 5 1K)，如图 3.1.12(b)所示，配置完成的信号源产生没有偏置电压，峰-峰值为 2V，经过 1kHz 信号调制的 10kHz 正弦波，如图 3.1.12(c)所示。



(a) 单频调频波波形配置对话框

图 3.1.12 单频调频波信号的配置及输出波形

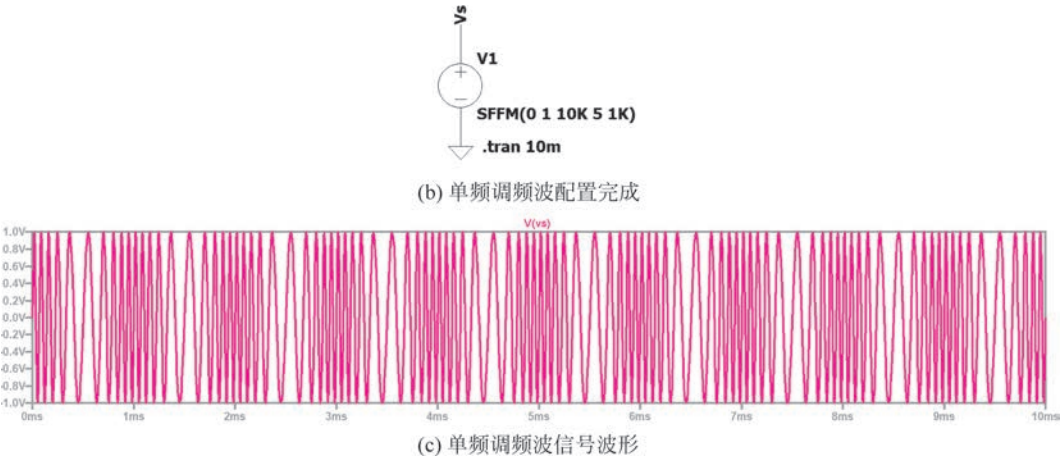


图 3.1.12 (续)

关于 LTspice 涉及的其他波形,如方波、指数波、折线波等,请参考官网或相关文献。

4. 复杂信号源设置

在元件配置按钮上,选择“bv”,配置电路图。电压(电流)源由几个电压和电流的函数组成,可制作复杂运作的电源,如电压源的配置。如图 3.1.13 所示,通过设置函数“ $V=F(\dots)$ ”,即可配置复杂的电压信号。AM 信号、DSB 信号和 FM 信号可通过这种方式获取。

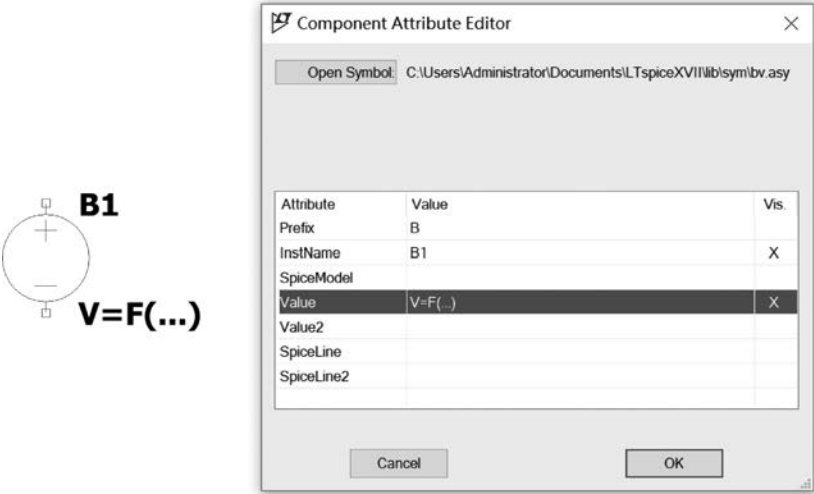


图 3.1.13 复杂信号的配置及输出波形

3.1.5 电路仿真命令

在本章的电路中,主要用到瞬态分析、交流分析、静态工作点分析等方式。而 LTspice 总共提供 6 种分析方式,关于其他的分析请参考官网或相关文献。

1. 仿真类别

电路图绘制完成,执行 Simulate→Edit Simulation Command 菜单命令,或者在电路图绘制窗口右击,选择 Edit Simulation Command 选项,如图 3.1.14 所示,进入仿真类型设置

窗口,如图 3.1.15 所示。仿真包含的类型有 Transient(瞬态分析)、AC Analysis(交流分析)、DC sweep(直流分析)、Noise(噪声分析)、DC Transfer(直流小信号分析)和 DC op pnt(静态工作点分析)6 种。上述分析类型与特点见表 3.1.2。

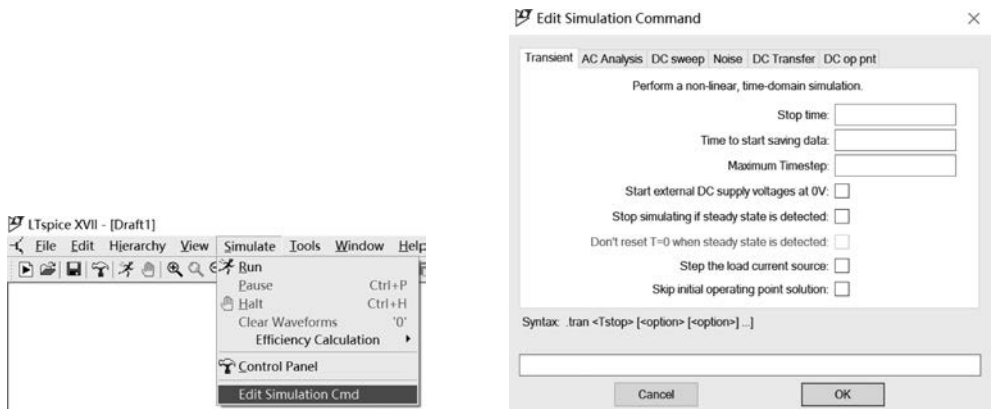


图 3.1.14 仿真命令对话框

图 3.1.15 仿真方式设置窗口

表 3.1.2 仿真类型分析与特点

分析类型	功能特点
瞬态分析	时间响应分析,类似示波器功能
交流分析	频率特性分析,增益、相位随频率的变化而变化
直流分析	静态特性分析,数据手册中的直流特性
噪声分析	测量点的噪声分析,需要模型具有噪声参数
直流小信号分析	分析直流小信号的传递函数
静态工作点分析	晶体管工作点分析

2. 瞬态分析

瞬态分析是仿真最基本的指令,是对电路中各节点的电压、电流随时间变化进行解析的指令,如图 3.1.15 所示,仿真方式设置窗口默认为瞬态分析,具体内容如下。

Stop Time: 停止时间,从仿真开始到停止的持续时间,以 s 或 ms 等单位。瞬态分析通常只填写该项内容。

Time to Start Saving Data: 数据保存的起始时间,在该值之前的仿真结果不保存。

Maximum Timestep: 设置执行仿真的最大间隔时间,不填写时表示无限大。

Start external DC supply voltages at 0V: 勾选之后,仿真开始后的 20μs,电路的供电电源从 0V 达到设定电压值。

Stop simulating if steady is detected: 勾选之后,针对开关电源进行仿真时,若输出呈现重复开关状态累计 10 次,停止仿真并保存这 10 次数据。

Don't reset T=0 when steady state is detected: 该项默认不能使用。执行 Stop simulating if steady is detected 之后,再勾选该项保存全部进行仿真的波形,不止 10 次周期模型。

Skip initial operating point solution: 在仿真开始难以收敛时,勾选该项跳过初始状态进行仿真,以节省时间。

3. 交流分析(频率响应的分析、小信号交流分析)

交流分析标签中,可设定交流分析(交流分析、频率特性分析)必要的参数,主要是对幅

频特性与相频特性进行交流分析。解析频率一般覆盖 $10\sim 100\text{MHz}$ 较为宽阔的范围,因此频率轴通常显示对数刻度。交流分析参数配置如图 3.1.16 所示。

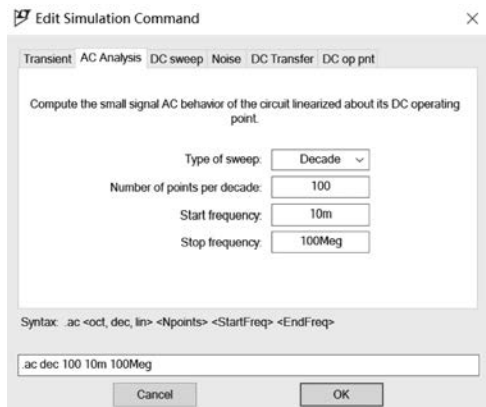


图 3.1.16 交流分析参数配置

Type of sweep: 扫描方式包括 Octave(每 8 倍频)、Decade(每 10 倍频)、Liner(线性扫描)、List(按列表频率)。

Number of points per Decade: 每个倍频间隔的点数,通常每 8 倍频为 $20\sim 40$ 个,10 倍频为 $30\sim 100$ 个。

Start frequency: 仿真起始频率。

Stop frequency: 仿真停止时间。

交流分析的执行,必须在分析电路的输入部分仿真交流信号源,如图 3.1.17 所示。把“Small signal AC analysis(AC)”的“AC Amplitude”的数值设置为 1。

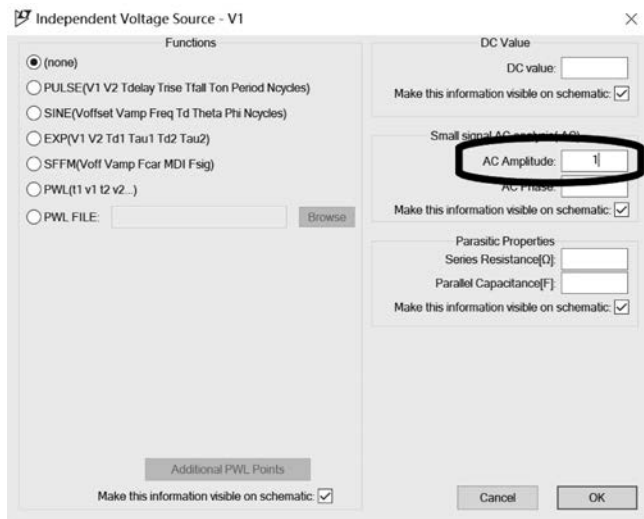


图 3.1.17 交流分析用的信号源配置

4. 静态工作点分析

该方法用于分析计算晶体管静态工作点,在仿真中电容视为开路,电感视为短路。在该分析中不需要设置任何参数,如图 3.1.18 所示。

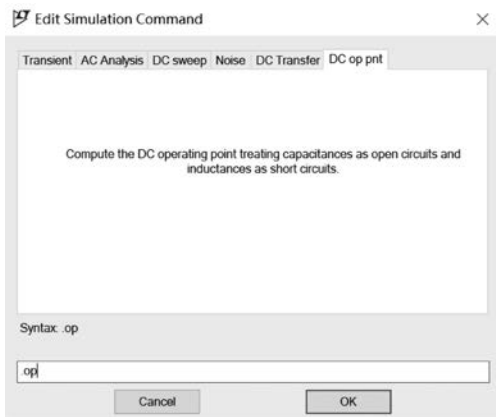


图 3.1.18 静态工作点参数配置

3.1.6 波形显示器

1. 波形显示基本操作

完成电路图绘制、仿真指令配置后,单击工具栏  图标执行仿真操作界面,将新增波形显示窗口,默认为无数据显示。在电路图绘制窗口中,移动光标靠近非地的电压节点时,光标变为电压探测笔,单击电压节点,波形显示窗口呈现该节点的电压波形。光标移动到器件上,光标变为电流探测笔,单击器件波形显示窗口将呈现该器件的电流波形。

LTspice 测量的节点电压波形默认以地为参考,当测量电路中两个节点电压差值时,移动光标指向其中一个待测节点,并单击,然后拖动鼠标移动到另一节点,当两个节点都显示电压测量的图标时,松开鼠标左键。

显示电压或电流信号,与频率分析相关的增益或相位特性等的区域称为“波形显示窗口”。只要启动仿真实验,波形显示窗口就会自动弹出。测试电压的波形如图 3.1.19 所示,测试电流的波形窗口如图 3.1.20 所示。也可以在一个窗口中同时显示多个测量量,如测试电压和电流,如图 3.1.21 所示。

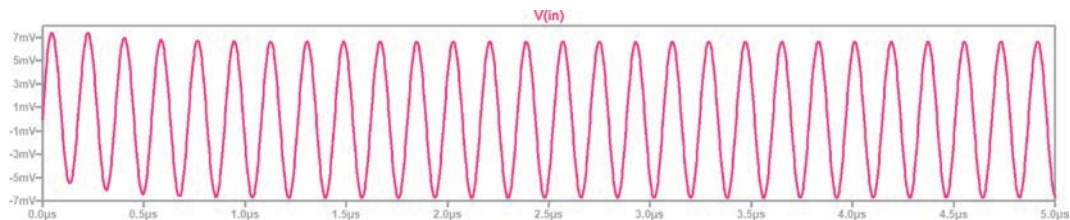


图 3.1.19 测试电压窗口

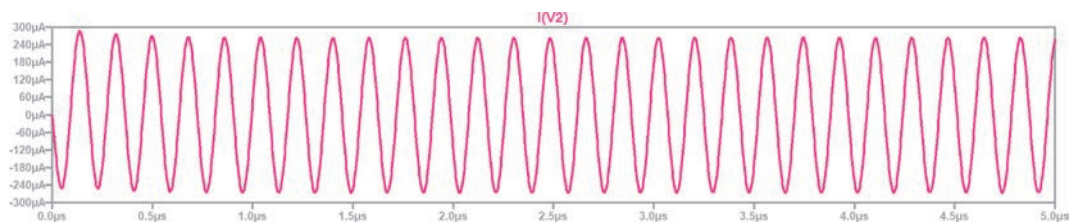


图 3.1.20 测试电流窗口