第3章

高频电子线路仿真与设计

CHAPTER 3

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。

ина и инализии инализии и инализии инализи инализии инализии инализи инализи инализи инализии инализи инализи инализи инализи	SPECIMET TO COT		
Stitute i Haz Average Cet Angeletis is, Beither Cetting Weither Termination in the control of t	对我。成果,原理图 符号和2C-1	使用LTspice的优势	
下載し「Tspice 下紙品冊子は下操作為給資品Tspiceの消費取件: 物理部所注册 - 2022-01-21 Windows 7、8年110 32位的資料版) 版本 17.0.32 Windows 7、8年110 32位的資料版) 版本 17.0.32 Windows 7、8年110 8月10 時代日常下版 () MacOS 10.0197下版 (2)時代年版) 版本 17.0.40 MacOS 10.0197下版 (2)時代年版 (2)時代表, 不再運動) 下版用子 Windows XP 目したpice (2)時代表, 不再運動)	001118-0114928 • 85-28-0145-118 • 8054250118 • 80541508118 • 80541508118 • 80541518 • 80541518 • 80541518		
下報送用于以下操作系统的3.1%pice的项目31: 使使更新任期 - 2022-01-21 Windows 7. 最有110 322位的下载 0.64 17.0.32 Windows 7. 最有110 542位的下载 0.64 17.0.32 MacOS 10.10的下载 (2156年、百姓美) 0.54 17.0.40 MacOS 10.0的下载 (2156年、百姓美) 下截用于 Windows X-9 世(1spice (2156年、百姓美))		下载LTspice	
Windows 7、84(11) 32(5)(11) F載) 65本 17.0.32 Windows 7、84(11) 64(5)(5) F載) 55本 17.0.32 MacOS 10.10(5)(下載与秋安) 55本 17.0.40 MacOS 10.9(7) F載(支)所後来,不再要約) 下載用于Windows AP 的L15(pice (支)核後来,不再要約)		下板运用于以下操作系统的LTspice/6页软件: 维华电断日期 - 2022-01-21	
Windows 7, 843110 846(25) F 役) 取本 17.0.52 MacOS 10.1093 F 配 行政党) 取本 17.0.40 MacOS 10.097 F ሺ (史)結束, 不再更新) 下租用于 Windows AP 的 L1tppice (支)转法束, 不再更新)		Windows 7. 84(10-32(位的下板) 版本 17.0.32	
MacCG 10.1097下載/当核型 版本 17.0.40 MacCG 10.997下載(支持核束,不再選集) 下載用于 Windows XP 的 L1tppke (支持核束,不再選集)		Windows 7, 8月10 64位的下版 版本 17.0.32	
MauCO 10.90下程(支持结束,不调要新) 下程用于 Windows XP 的 L1tppke (支持结束,不再更新)		MacOS 10.10的下载与修发 版本 17.0.40	
下租用于 Windows XP 的 LTspice (支持结束,不再更新)		MacOS 10.9的下载 (支持结束,不再更新)	
		下舠用于 Windows XP 的 LTspice (皮)称结束。不再更新)	

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。

```
▶ ※ 目 室 ズ き & Q Q Q 総 照 目 電 智 & B 電 确 日 当 2 七 甲 2 ÷ 3 × ひ ジ ひ ひ ご 品 品 A ♥
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 ☑ @ < + 3 辛 的图标添加。



第三步:布局布线。根据设计的电路图,使用
⑨ 图标挪动器件,放置相应的元件器到合适的位置,然后使用
② 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。



Select	Standar	d Resistor			\times
		Quit ar	nd Edit Database	ОК	
	[List All Re	esistors in Database	e Canc	el
R[Ω]	Mfg.	Part No.	Power[W]	Tolerance[%]	^
10.00K		_	0.100	1.00	
10.20K			0.100	1.00	
9.76K			0.100	1.00	
9.53K			0.100	1.00	
10.50K			0.100	1.00	
9.31K			0.100	1.00	
10.70K			0.100	1.00	
9.09K			0.100	1.00	
11.00K			0.100	1.00	
0.0712			0.100	1.00	~

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 10⁶使用 Meg 表示,如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 单位词头符号

符号	Т	G	Meg	K	m	u	n	р	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

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

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。

Functions	DC Value
(none)	DC value:
OPULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Ncycles)	Make this information visible on schematic
SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Novcles)	
EXP(/1 \/2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)	Small signal AC analysis(AC)
	AC Amplitude:
SFFM(Vott Vamp Fcar MDI Fsig)	
) PWL(t1 v1 t2 v2)	AC Phase:
PWL FILE: Browse	Make this information visible on schematic:
	Parasitic Properties
	Series Resistance[Ω]:
	Parallel Capacitance[F]:
	Make this information visible on schematic:
Additional PWL Points	
Make this information visible on schematic	Canad

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。

Functions			DC Value
(none)			DC value
O PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period	od Ncycles)		Make this information visible on schematic:
SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi No.	cycles)		
O EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)			Small signal AC analysis(.AC)
O SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)			AC Amplitude:
O PWL(t1 v1 t2 v2)			AC Phase:
OPWL FILE:	Bro	wse	Make this information visible on schematic:
			Parasitic Properties
DC offset[V]:	1		Series Resistance[Ω]:
Amplitude[V]:	1		Parallel Capacitance[F]:
Freq[Hz]	10K		Make this information visible on schematic:
Tdelay[s]:			
Theta[1/s]:			
Phi[deg]:			
Ncycles:			
Additional PWL	Points		
Make this information visible or	n schematic: 🗸	7	Cancel OK

(a) 正弦配置对话框

图 3.1.11 正弦信号的配置及输出波形



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

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

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。

Independent Voltage Source - V1		
Functions		DC Value
(none)		DC value
OPULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Peri	iod Ncycles)	Make this information visible on schematic:
SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi N	(cycles)	
EXPO(1 \(2 Td1 Tau1 Td2 Tau2))		Small signal AC analysis(AC)
		AC Amplitudo
SFFM(Vott Vamp Fcar MDI Fsig)		
O PWL(t1 v1 t2 v2)		AC Phase:
O PWL FILE:	Browse	Make this information visible on schematic:
		Parasitic Properties
DC offsetIVI:	0	Series Resistance[Ω]:
AmplitudeDA	1	Parallel Capacitance[F]:
	10K	Make this information visible on schematic:
	5	
Modulation Index:	3	
Signal Freq[Hz]:	1K	
Additional PWL	Points	
Make this information visible o	n schematic: 🔽	Cancel OK

(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



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(…)",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。

	Open Symbol	C:\Usersv\u00e4ministrator\Documents\L1spiceXv11vib	osymiov.asy
1	Attribute	Value	Vis.
	Prefix InstName SpiceModel	B B1	x
- = ()	Value	V=F()	X
-()	Value2		
	SpiceLine		
	SpiceLine2		
			_
	Car	OK	

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等为单位。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 10~100MHz 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。

Transient AC	Analysis DC sweep Noise DC Ti	ransfer DC op pnt	
Compute the	small signal AC behavior of the circ point.	uit linearized about i	ts DC operatin
	Type of sweep:	Decade 🗸	
	Number of points per decade:	100	
	Start frequency:	10m	
	Stop frequency:	100Meg	
Syntax: .ac <oc< td=""><td>t, dec, lin> <npoints> <startfreq> ·</startfreq></npoints></td><td><endfreq></endfreq></td><td></td></oc<>	t, dec, lin> <npoints> <startfreq> ·</startfreq></npoints>	<endfreq></endfreq>	
ac dec 100 10r	n 100Meg		

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20~40个,10倍频为30~100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。

9 Independent Voltage Source - V1		>
Independent Voltage Source - V1 Functions (none) PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfail Ton Penod Nc SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi Noydee EXP(V1 V2 Td1 Tau 1 Td2 Tau2) SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig) PWL(11 v1 12 v2_) PWL FILE:	ydes) s) Browse	DC Value DC
Additional PWL Point	S	Make this information visible on schematic:
Make this information visible on sch	ematic: 🗹	Cancel OK

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。

第3章 高频电子线路仿真与设计 Ⅲ▶ 99

ransient	AC Analysis	DC sweep	Noise	DC Transfer	DC op pnt	
c	ompute the D	C operating indu	point tre ctances	ating capacit as short circu	ances as open its.	circuits and
intax or	,					
/ntax:.op	3					

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。

