

第3章 Proteus ISIS 电路仿真

Proteus ISIS 电路仿真是指利用其提供的库元件及相应的数据模型，通过计算和分析表示当前设计电路工作状态的一种手段。通过仿真能使电路原理图像实物一样“运行”起来，可以提前验证设计思路是否合理，元件及参数选择是否正确，流程及程序设计是否可靠。本章将对 Proteus ISIS 电路仿真进行详细介绍。

3.1 电路仿真基础

Proteus ISIS 电路仿真包括两种不同的仿真方式：交互式仿真和基于图表的仿真。两种仿真方式详细说明如下：

- 交互式仿真：又称为实时仿真，用来检验用户设计的电路是否能够正常工作。交互式仿真利用 Proteus ISIS 提供的虚拟仪器实时监控仿真电路状态变化，可以实时直观地反映当前电路运行状态。
- 基于图表的仿真：又称为非实时仿真，用来研究电路的工作状态及进行细节测量。基于图表的仿真是一个将电路仿真过程和结果观测分开的过程，仿真结果被输出到 Proteus ISIS 提供的图表工具中，可以在仿真完成之后进行分析。

电路仿真工具包括虚拟仪器、探针、激励源、图表等，其详细说明如下：

- 虚拟仪器 (Virtual Instruments)：是实际电路仪器的软件虚拟化版本，可以用于观测电路的运行状况，包括示波器、逻辑分析仪等。
- 探针 (Probe)：用于记录所连接网络的状态。Proteus ISIS 提供了电压探针 (Voltage Probe) 和电流探针 (Current Probe) 两种探针工具，置于电路中可以用于采集和测量放置点电压或者电流信号。
- 激励源 (Generator)：Proteus ISIS 提供了多种形式的激励源，在激励源模式下，用户可以在元件选择窗口中进行设置。此类元件属于有源元件，可以在 Active 库中找到。
- 图表 (Graph)：图表分析可以对仿真结果进行直观的分析。更为重要的是，图表分析能够在仿真过程中放大一些需要特别观察的部分，进行一些细节上的分析。此外，当在实时中难以作出分析时，图表分析也是唯一的方法。

通过单击工具栏上对应的按钮，可以进入相应的仿真工具操作模式，这些按钮如图 3-1 所示。



图 3-1 电路仿真工具按钮

3.2 交互式仿真

交互式仿真包括电路图设计、仿真工具设置、运行和观察电路状态等，其详细步骤如下：

- (1) 绘制需要仿真的电路原理图，与第 2 章介绍的原理图绘制方法相同，不再重复。
- (2) 设置电路的相应参数，包括输入激励源等。
- (3) 对电路进行电气规则检查。
- (4) 在需要测量的节点上放置对应仿真检测工具，如示波器等。
- (5) 运行仿真，通过相应的检测工具观测电路的运行状态并修改电路中的输入以观测电路输出变化。

【例 3-1】 Proteus ISIS 的交互式仿真

本实例以一个差分比例运算放大器为例进行交互式仿真。

操作步骤

- (1) 基础电路图绘制参考第 2 章的例 2-2，如图 3-2 所示，包括 1 个运算放大器 741、4 个电阻、2 个 POWER 终端和 1 个 GROUND 终端。

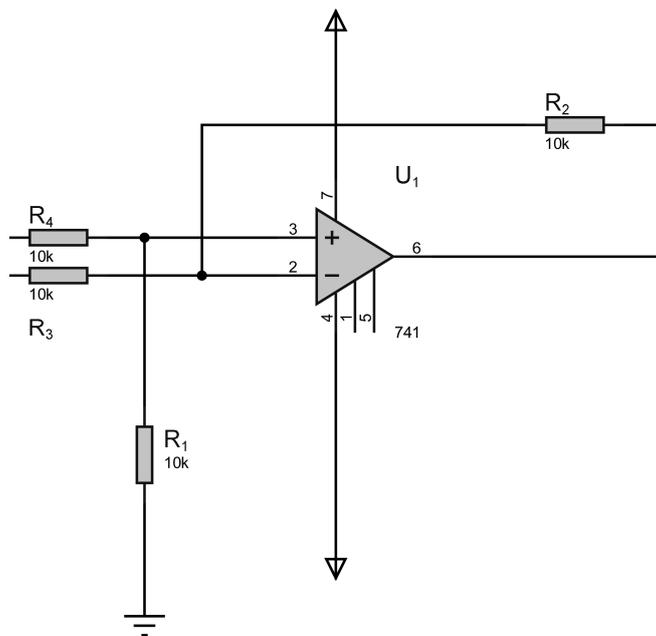


图 3-2 交互式仿真实例原理图

- (2) 将 POWER 终端属性分别设置为 +12V 和 -12V，4 个电阻值修改为 10kΩ。
- (3) 单击工具箱中的激励源按钮，然后选择 DC 源，如图 3-3 所示，在电阻 R₃ 和 R₄ 的输入端分别放置两个 DC 输入源。

(4) 单击工具箱中的电压探针按钮，在 741 的输出端放一个电压探针，放置输入源和探针后的电路如图 3-3 所示。

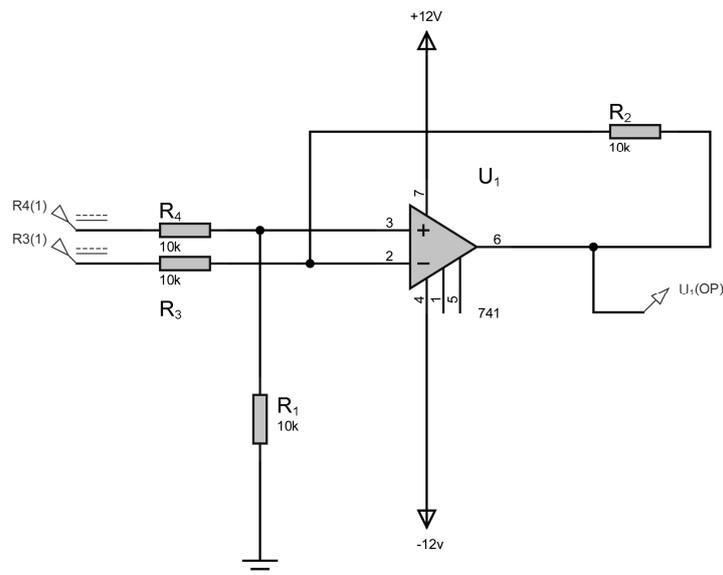


图 3-3 放置完输入源和探针的电路

(5) 将输入源 $R_4(1)$ 和 $R_3(1)$ 的电压分别修改为 8V 和 5V。

(6) 单击仿真工具栏的运行按钮，此时可以在电压探针 $U_1(OP)$ 上看到输出电压，如图 3-4 所示。

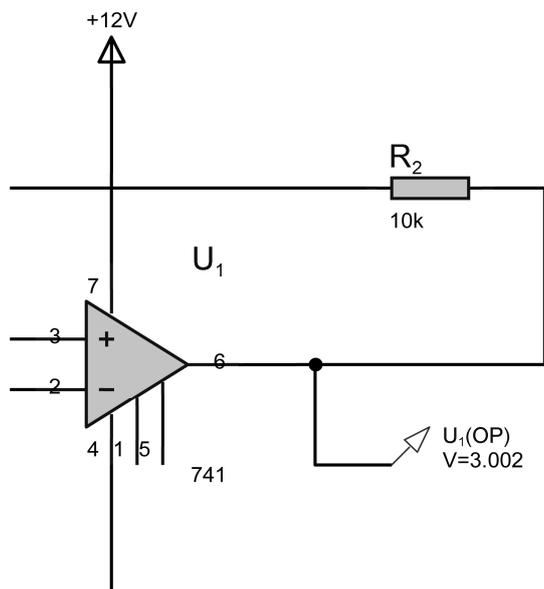


图 3-4 交互式仿真输出电压

本实例是一个典型的差分比例运算电路，根据电路原理可以得到如下计算公式：

$$U_1(OP) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) (R_4(1) - R_3(1)) \quad (1)$$

从以上公式得到结果如下：

$$U_1(OP) = R_4(1) - R_3(1) \quad (2)$$

3.3 基于图表的仿真

交互式仿真虽然能够直观地显示电路当前的仿真情况，但是这些仿真状态随着仿真结束就消失了，不能满足长时间的分析要求，针对这种情况，Proteus ISIS 提供了基于图表的仿真。

3.3.1 基于图表仿真的步骤

基于图表的仿真随着电路参数的修改，电路中各点波形将重新生成，并且以图表的形式保留在电路图中，可供后续分析使用。基于图表仿真的详细步骤如下：

- (1) 绘制原理图。
- (2) 在需要仿真的端点添加激励源，在被观察的端点放置探针，然后编辑激励源和探针的属性。
- (3) 放置对应的仿真图表，如频率图形显示的频率分析。
- (4) 给图表添加相应的信号发生器和测试探针，以显示它们所产生的数据/记录。
- (5) 设置仿真参数，然后开始执行图表仿真。

【例 3-2】 Proteus ISIS 的基于图标仿真

本实例使用基于图表的仿真对例 3-1 的电路进行仿真，但在本实例中输入改为正弦波。

操作步骤

- (1) 双击输入源 $R_4(1)$ ，修改其属性参数，如图 3-5 所示，输入源 $R_3(1)$ 同 $R_4(1)$ 。

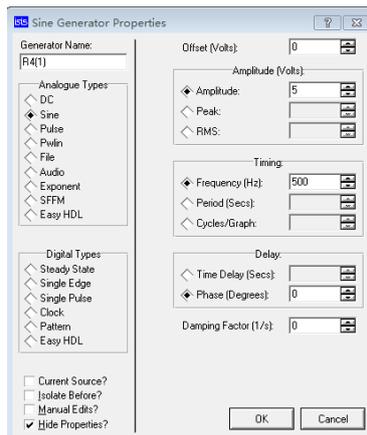


图 3-5 正弦波输入信号属性修改对话框

(2) 在电路图中添加两个电压探针，用于监控激励源的输入信息，命名为 V_1 和 V_2 ，如图 3-6 所示。

(3) 单击工具箱中的图形模式按钮，在元件窗口显示图形所对应的波形种类，如图 3-7 所示。

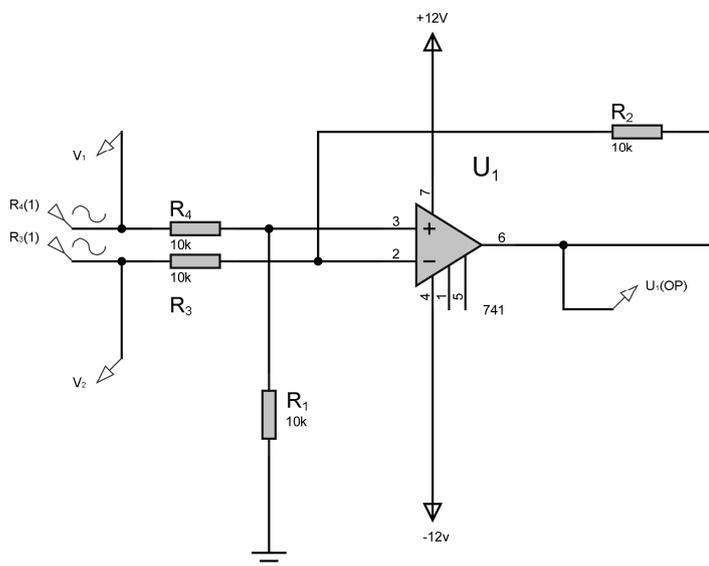


图 3-6 添加电压探针后的电路图

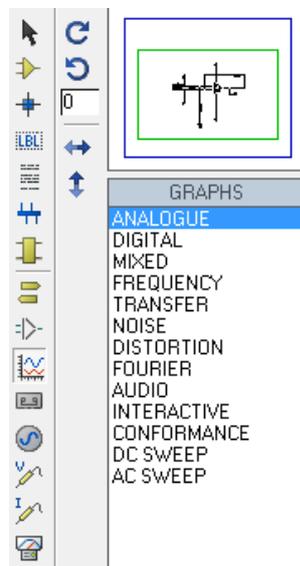


图 3-7 图形模式对应的波形种类

(4) 选择模拟波形 (ANALOGUE)，并在电路图中绘制一个如图 3-8 所示的矩形框。

(5) 在矩形框中添加对应探针的仿真曲线，选择 **Graph**→**Add Trace** 选项，打开如图 3-9 所示的对话框。



图 3-8 模拟波形矩形框

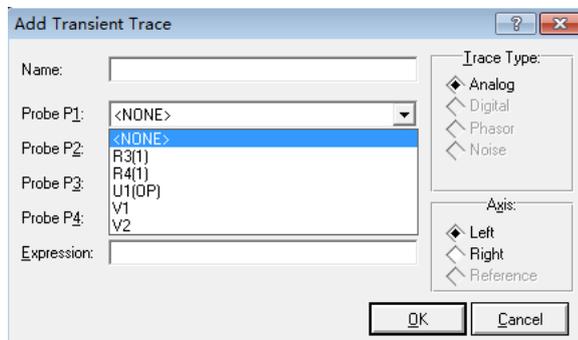


图 3-9 添加对应探针的仿真曲线对话框

(6) 单击 **Probe** 的下拉菜单，能够选择对应探针，本实例首先选择 V_1 ，在 **Name** 中输入 V_1 ，单击 **OK** 按钮完成添加过程，此时在图形框中可以显示出对应的波形曲线名，如图 3-10 所示。重复步骤 (5) 和 (6)，完成 V_2 和 $U_1(OP)$ 的添加过程。

(7) 选择 **Graph**→**Simulate Graph** (基于图表的仿真) 选项，输出仿真波形结果如图 3-11 所示。

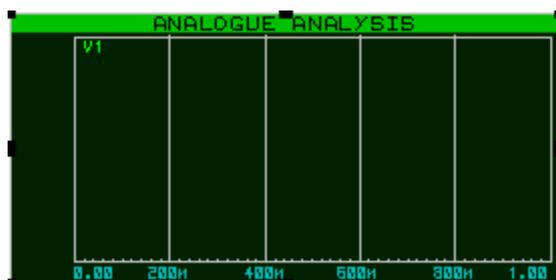


图 3-10 添加波形曲线后的图形框

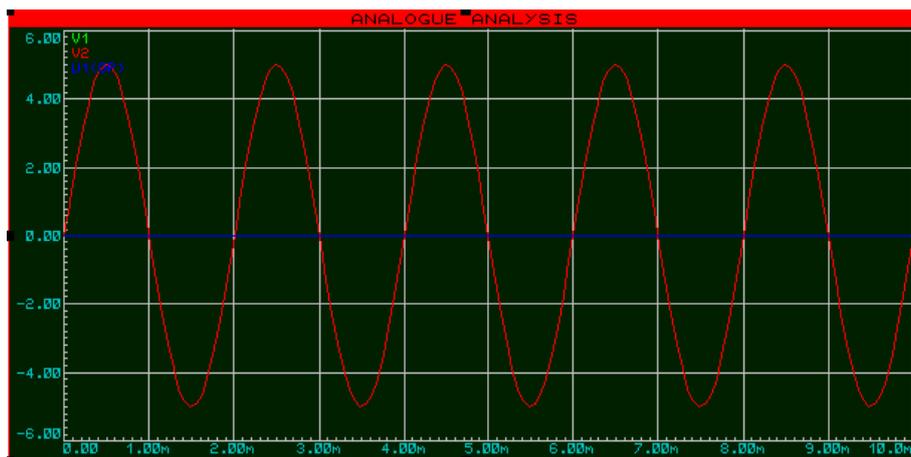


图 3-11 基于图表的仿真输出波形

(8) 双击图表框体标题 ANALOGUE ANALYSIS, 出现如图 3-12 所示的波形输出窗口。

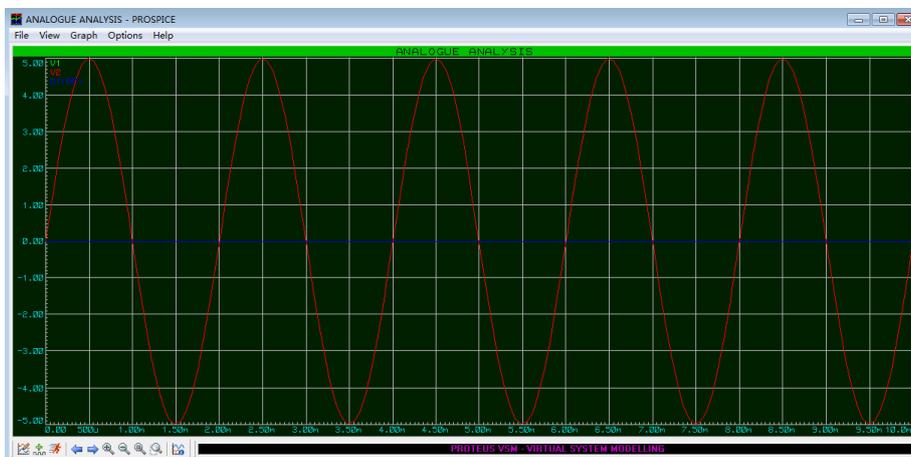


图 3-12 仿真波形输出窗口

(9) 为方便查看输出波形, 可以通过选择输出窗口的 Options→Set Graph Color 命令, 将输出窗口背景设置为白色。

3.3.2 Proteus ISIS 的仿真图表

在 Proteus ISIS 中除了模拟仿真图表之外,还提供了如表 3-1 所示的多种图表。图表在仿真中是最重要的部分,它不仅是结果的显示媒介,而且定义了仿真类型。通过放置一个或若干个图表,用户可以观测到各种数据(数字逻辑输出、电压、阻抗等),即通过放置不同的图表来显示电路在各方面的特性。

表 3-1 仿真图表及含义

名 称	含 义
ANALOGUE	模拟分析图表
DIGITAL	数字分析图表
MIXED	混合分析图表
FREQUENCY	频率分析图表
TRANSFER	转移特性分析图表
NOISE	噪声分析图表
DISTORTION	失真分析图表
FOURIER	傅里叶分析图表
AUDIO	音频分析图表
INTERACTION	交互分析图表
CONFORMANCE	一致性分析图表
DC SWEEP	直流扫描分析图表
AC SWEEP	交流扫描分析图表

1. 模拟分析图表

模拟分析图表仿真是最基本的图表仿真之一,其主要应用在模拟电路中,用于绘制一条或者多条电压/电流等参数随时间变化的曲线,以时间轴为 X 轴,以电压/电流等为 Y 轴。因为测量值随时间的变化而变化,因此这种方法为瞬态分析法,也称为时域的暂态分析。

2. 数字分析图表

数字分析图表在瞬态仿真中用于绘制逻辑电平随时间变化的曲线,以 X 轴为时间轴, Y 轴显示垂直方向信号的积累,这个信号可以是单个的位数据,也可以是总线信号。数字图表分析又称为数字暂稳态分析。

3. 混合分析图表

混合分析图表以时间为 X 轴,同时将模拟信号和数字信号显示在同一图表上,以便观察和对比,只有混合分析图表具有这样的功能,混合分析图表又称为混合模式瞬态分析。

4. 频率分析图表

频率分析的作用是分析电路在不同频率工作状态下的运行情况。但不像频谱分析仪,所有频率一起被考虑,而是每次只可分析一个频率。所以,频率特性分析相当于在输入端

接一个可改变频率的测试信号，在输出端接一个交流电表测量不同频率对应的输出，同时可得到输出信号的相位变化情况。频率特性分析还可以用来分析不同频率下的输入和输出阻抗。

此功能在非线性电路中使用是没有实际意义的。因为频率特性分析的前提是假设电路为线性的，就是说，如果在输入端加一个标准的正弦波，在输出端也相应地得到一个标准的正弦波。实际中完全线性的电路是不存在的，但是大多数线性电路是在此分析允许范围内的。另外，由于系统是在线性情况下且引入复数算法（矩阵算法）进行的运算，其分析速度要比瞬态分析快许多。

频率分析图表用于绘制小信号电压增益或电流增益随频率变化的曲线，即绘制波特图，可描绘电路的幅频特性和相频特性。但它们都是以指定的输入发生器为参考。在进行频率分析时，图表的 X 轴表示频率，两个纵轴可分别显示幅值和相位。

5. 转移特性分析图表

该图表用于绘制半导体元件的转移特性曲线，每条曲线的 Y 轴是工作点电压或者电流值， X 轴为指定的信号，以 X - Y 进行扫描形成一条曲线，还可以指定一个激励源作为参考信号，以产生一组曲线。

6. 噪声分析图表

由于电阻或半导体元件会自然而然地产生噪声，这对电路工作会产生相当程度的影响。系统提供噪声分析就是将噪声对输出信号所造成的影响数字化，以供设计师评估电路性能。

在分析时，SPICE 模拟装置可以模拟电阻及半导体元件产生的热噪声，在进行噪声分析时，将线路中所有噪声的变化转变为电压的变化，在一定的频率范围内绘制出该值的变化情况，噪声电压与噪声带宽的平方根成正比，然后按相对频率绘制图形。图表轨迹的单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

在基于噪声分析图表的仿真中，一般有等效输入噪声和输出噪声两种类型。在实际仿真中考虑的是一定的频率范围内输出噪声电路的增益。在仿真时，输出噪声探针放置在左侧的 Y 轴，等效输入噪声放在右侧的 Y 轴。噪声分析往往产生非常小的值（nV），所以常常使用 dB（分贝）来显示。0dB 的参考值为 $1V/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

7. 失真分析图表

失真是由电路的传递函数中非线性元件产生的，线性元件组成的电路不会产生失真，SPICE 失真分析模型可以仿真二极管、双极性晶体管、JEFT 和 MOSFET。

失真分析图表用于确定由测试电路所引起的电平失真程度，失真分析图表用于显示随频率变化的二次和三次谐波失真电平。

8. 傅里叶分析图表

傅里叶分析是把时域分析转换为频域分析的一种方法，并不像利用示波器测试频率那样，傅里叶分析用于分析一个时域信号的直流分量、基波分量和谐波分量，即把时域信号

进行傅里叶分析转换为频域信号,把信号转换为—组幅度和相位各不相同的正弦信号的和。

傅里叶分析首先要进行瞬态分析,然后进行快速傅里叶变换,在这个过程中要对时间域进行采样,采样满足奈奎斯特采样定理。简言之,就是观察的信号是采样频率的一半,由于其他原因有可能导致观察到的信号高于采样频率的一半,这时应该在进行傅里叶变换前选择不同类型的数据输入窗口。

在对电路进行傅里叶分析时,一般将线路中的交流激励源频率设置为基频,若电路中有多个交流激励源时,基频为这些信号频率的最小公倍数。

9. 音频分析图表

音频分析图表能够让设计者监听电路的输出(必须安装声卡),音频分析图表仿真与模拟仿真图表类似,不同之处在于音频分析图表仿真结束会产生 Windows 的 WAV 格式的时域文件,并通过声卡(采样频率为 11 025Hz、22 050Hz、44 100Hz)回放出来。轨迹线必须加载在图表的左侧 Y 轴。

10. 交互分析图表

交互式分析结合交互式仿真与图表仿真的特点。在仿真过程中,系统会建立交互式模型,但是分析结果是用一个瞬态分析图表记录和显示的。交互分析特别适用于观察电路仿真中某一个单独操作对电路产生的影响,例如,变阻器变化对电路的影响情况,相当于将示波器和逻辑分析仪结合在一个装置上。

分析过程中,系统按照混合模型瞬态分析的方法进行计算,不过仿真是在交互式模型下进行的,因此在仿真过程中,键盘、鼠标和开关等各种激励源的操作都会对电路仿真产生影响。同时,仿真速度也取决于交互式仿真中设置的时间步长。应当引起注意的是,在分析过程中,系统将获得大量数据,处理器每秒将会产生数百万个事件,产生的各种事件将占用大量内存,这就很容易使系统崩溃,所以不宜进行长时间仿真,这就是说,短时间仿真不能实现时,可应用逻辑分析仪。另外,和交互式仿真不同的是,许多组成电路不支持该分析。

通常可以借助交互式仿真中的虚拟仪器实现观察电路中的某一单独操作对电路产生的影响,但有时需要将结果用图表的方式显示出来,以便更详细地分析,这时就需要用交互式分析实现。

11. 一致性分析图表

一致性分析图表将两组数字仿真结果保存在图表中,然后比较这两组数字仿真的结果,快速测试出改变后的设计是否给电路带来不期望的副作用。一致性分析图表主要用于嵌入式系统的测试。将两组数字仿真结果分别称为测试结果和参考结果。

电路是否具有—致性,由在初始轨迹的每一个边沿处的测试结果与参考结果的比较情况来确定。初始轨迹线称为控制轨迹线,它以不同的颜色显示,以便与其他曲线区分。

12. 直流扫描分析图表

直流扫描分析主要观察电路的直流工作点,通过图表可以观察电路元件参数在定义范

围内发生变化时对电路的工作状态造成的影响，例如，观察晶体管的放大倍数、电路工作温度等参数发生变化时对电路状态的影响，也可以通过扫描激励源参数值实现直流传输特性曲线绘制。

直流扫描是对电路工作点中的某个变量进行变换，得到频率与变量之间的关系曲线，最后将频率-变量关系转换为时间-变量关系显示出来。

13. 交流扫描分析图表

交流扫描分析图表可以建立一组反映元件在参数值发生线性变化时的频率特性曲线。它主要用来观测相关元件参数值发生变化时对电路频率特性的影响。

交流扫描分析时，系统内部完全按照普通的频率特性分析计算有关值，不同的是，由于元件参数不固定而增加了运算次数，每次相应地计算一个元件参数值对应的结果。

3.3.3 Proteus ISIS 的仿真图表输出窗口

本节以模拟图表分析为例，介绍基于图表仿真波形图形的输出窗口的使用方法，其他类型的图表输出窗口可以参考模拟分析图表的输出窗口。

一个完整的基于图表仿真的波形输出窗口如图 3-13 所示，包括标题栏、菜单栏、时间轴（ X 轴）、电压轴（ Y 轴）、快捷工具栏、时间显示栏和波形输出栏等。

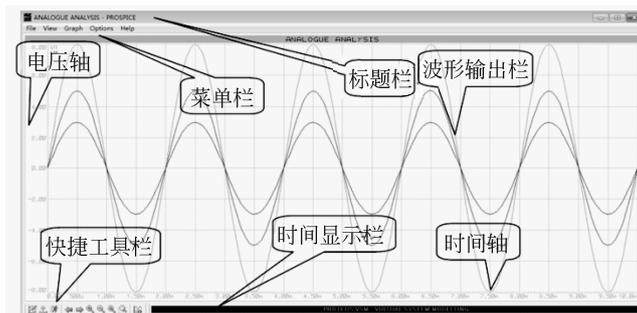


图 3-13 波形输出窗口说明

- 标题栏：给出的是当前进行图表仿真的图形框体名称。
- 菜单栏：和主菜单栏类似，包括一系列用于相应操作的菜单项，如 File、View、Graph、Options、Help 等。
- 波形输出栏：仿真波形输出窗口，在其中使用不同颜色来显示需要输出的波形，并且可以进行相应的操作，如放大、缩小或移动。
- 快捷工具栏：在快捷工具栏中，从左至右分别为 Edit Graph（编辑图形）、Add Trace（加入仿真曲线）、Simulate Graph（开始仿真）、Pan Graph Left（图形左移）、Pan Graph Right（图形右移）、Zoom In（放大）、Zoom Out（缩小）、Zoom All（显示全部图形）、Zoom to Area（局部放大）、View Log（查看仿真记录文件）。
- 电压轴和时间轴：在仿真波形输出窗口中， X 轴为输出波形的电压轴，用于显示当

前点的电压大小，其有效区间由输出波形的大小自动确定； Y 轴为输出波形的时间轴，其长度由仿真时间决定，时间轴的单位都是s（秒），可以通过放大或缩小操作来修改其当前显示的最小刻度值。

- 时间显示栏：在波形输出窗口中单击并拖动鼠标，会出现一条和 X 轴平行的选择线，该选择线所对应的 Y 轴时间点会在时间显示栏中显示出来，以告诉用户当前观察点的时间参数。

3.4 小结

本章介绍了两种不同的电路仿真方式，读者应了解并掌握两种电路仿真方式的优缺点以及适用的具体情况。本章还介绍了两种仿真方式的具体步骤，通过实例帮助读者掌握通过 Proteus ISIS 提供的原理图工具和仿真功能进行仿真的具体实现过程。

3.5 习题

- (1) Proteus ISIS 的仿真分为几类？分别是什么？
- (2) Proteus ISIS 的电路仿真工具包括哪几种？
- (3) 简述 Proteus ISIS 交互式仿真的步骤。
- (4) 简述 Proteus ISIS 基于图表仿真的步骤。
- (5) Proteus ISIS 中提供的仿真图表包括哪几种？