

第3章

测试系统电路仿真分析案例



3.1 Multisim 电路仿真软件

3.1.1 Multisim 软件简介

Multisim 软件是美国国家仪器(National Instruments, NI)公司推出的一款优秀的 EDA 软件,非常适用于板级模拟/数字电路板的设计、仿真分析工作,具有如下突出的特点。

1. 直观的图形界面

软件的操作界面就像一个电子实验工作台,绘制电路所需的元器件和仿真所需的测试仪器均可直接拖放到屏幕上,轻点鼠标即可用导线将它们连接起来,软件仪器的控制面板和操作方式都与实物相似,测量数据、波形和特性曲线如同在真实仪器上看到的。

2. 丰富的元器件库

软件包括基本元件、半导体器件、运算放大器、TTL 和 CMOS 数字 IC、DAC、ADC 及其他各种部件,提供了世界主流元件供应商的超过 17000 种元件,能方便地对元件各种参数进行编辑修改,能利用模型生成器以及代码模式创建模型,创建自己的元器件,新建或扩充已有的元器件库。

3. 强大的仿真能力

软件以 SPICE3F5 和 XSPICE 的内核作为仿真的引擎,既可对模拟电路或数字电路分别进行仿真,也可进行数模混合仿真,支持 VHDL 和 Verilog HDL 语言的电路仿真与设计;可以对被仿真的电路中的元器件设置各种故障,如开路、短路和不同程度的漏电等,从而观察不同故障情况下的电路工作状况;在仿真的同时,软件还可以存储测试点的所有数据,列出被仿真电路的所有元器件清单,以及存储测试仪器的的工作状态、显示波形和具体数据等。

4. 大量的虚拟测试仪器

Multisim 12.0 提供了 22 种虚拟仪器进行电路动作的测量,既有一般实验用的通用仪器,如万用表、函数信号发生器、双踪示波器、直流电源,还有一般实验室少有或没有的仪器,如波特图仪、字信号发生器、逻辑分析仪、逻辑转换器、失真仪、频谱分析仪和网络分析仪等。这些仪器的设置和使用与真实的仪器一样,动态交互显示。除了 Multisim 提供的默认的仪器外,还可以创建 LabVIEW 的自定义仪器,使得图形环境中可以灵活地可升级测试、测量及控制应用程序的仪器。

5. 完备的分析手段

软件可以完成电路的瞬态分析和稳态分析、时域和频域分析、器件的线性和非线性

分析、电路的噪声分析和失真分析、离散傅里叶分析、电路零极点分析、交直流灵敏度分析等电路分析方法,以帮助用户分析电路的性能。

6. 支持单片机编程仿真

软件支持 4 种类型的单片机芯片,支持对外部 RAM、外部 ROM、键盘和 LCD 等外围设备的仿真,分别对 4 种类型芯片提供汇编和编译支持;所建项目支持 C 代码、汇编代码以及十六进制代码,并兼容第三方工具源代码;包含设置断点、单步运行、查看和编辑内部 RAM、特殊功能寄存器等高级调试功能。

7. 完善的数据后处理功能

软件对分析结果进行的数学运算操作类型包括算术运算、三角运算、指数运行、对数运算、复合运算、向量运算和逻辑运算等。

8. 可输出详细的报告

软件能够呈现材料清单、元件详细报告、网络报表、原理图统计报告、多余门电路报告、模型数据报告、交叉报表 7 种报告。

9. 与其他 EDA 软件兼容性好

软件提供了转换原理图和仿真数据到其他程序的方法,可以输出原理图到 PCB 布线软件(如 Ultiboard、OrCAD、PADS Layout 2005、Protel);输出仿真结果到 MathCAD、Excel 或 LabVIEW 软件;输出网络表文件等。

10. 强大的虚拟实验功能

与传统的电子电路实验相比,虽然 Multisim 软件进行虚拟实验用的元器件及测试仪器仪表十分齐全,但是并不消耗实际的元器件,所需元器件的种类和数量也不受限制,可方便地对电路参数进行测试和分析,直接输出实验数据、测试参数、曲线,实验成本低,速度快,效率高。

11. 易学易用

只要经过简单培训,甚至自学,任何电子工程师都可以轻松掌握 Multisim 软件,快速构建仿真模型,验证自己的设计。

目前,在多数院校的电子信息类课程教学过程中,实验课往往受限于时间、场地和器材,直接影响相关理论的教学效果。利用 Multisim 软件的强大的仿真分析功能和虚拟实验环境,学生可以随时随地构建自己的实验平台,开展理论验证实验和综合性设计,极大地提高了学习热情和积极性,变被动学习为主动学习,提升独立分析、开发和创新能力。

3.1.2 Multisim 软件基本操作使用

本节以 NI Multisim 12.0 为对象,对该软件的操作进行说明。

1. 创建电路图

(1) 启动 Multisim 12.0 软件,出现如图 3-1 所示界面。

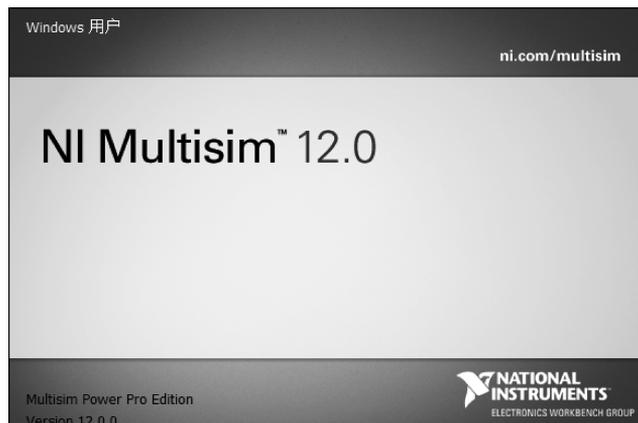


图 3-1 启动界面

启动后出现的窗口如图 3-2 所示。

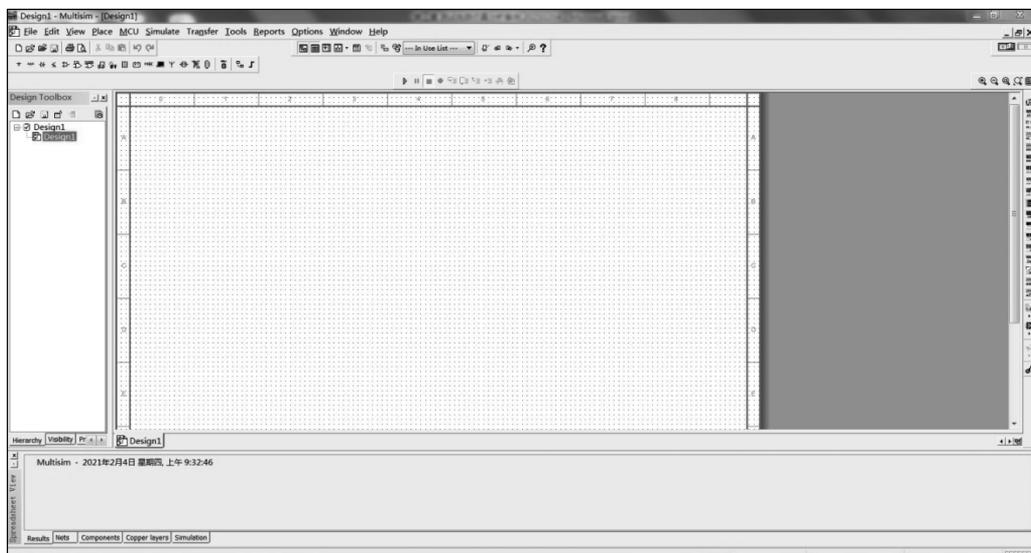


图 3-2 启动后的窗口

也可直接选择文件/新建/原理图,即弹出图 3-3 所示的主设计窗口。

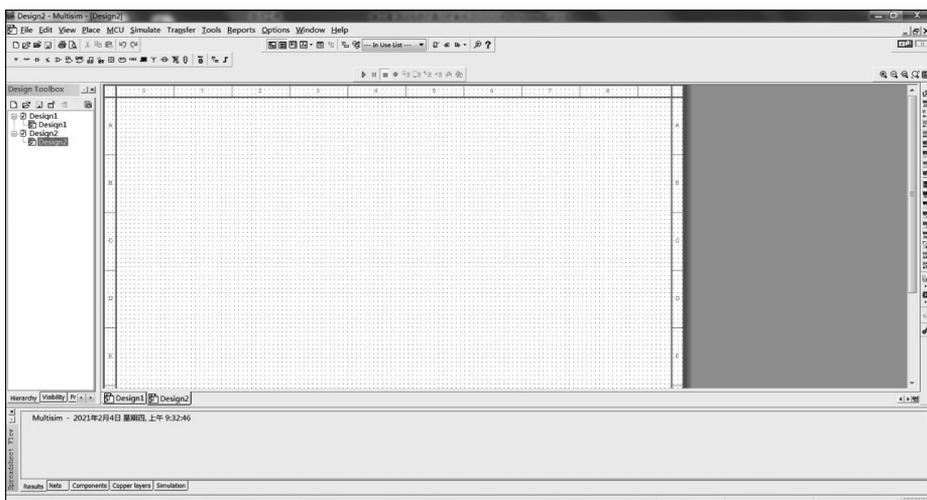


图 3-3 主设计窗口

(2) 添加元件。

打开元件库工具栏,单击需要的元件图标按钮(图 3-4),然后在主设计电路窗口中适当的位置再次单击鼠标,所需要的元件即可出现在该位置上,如图 3-5 所示。

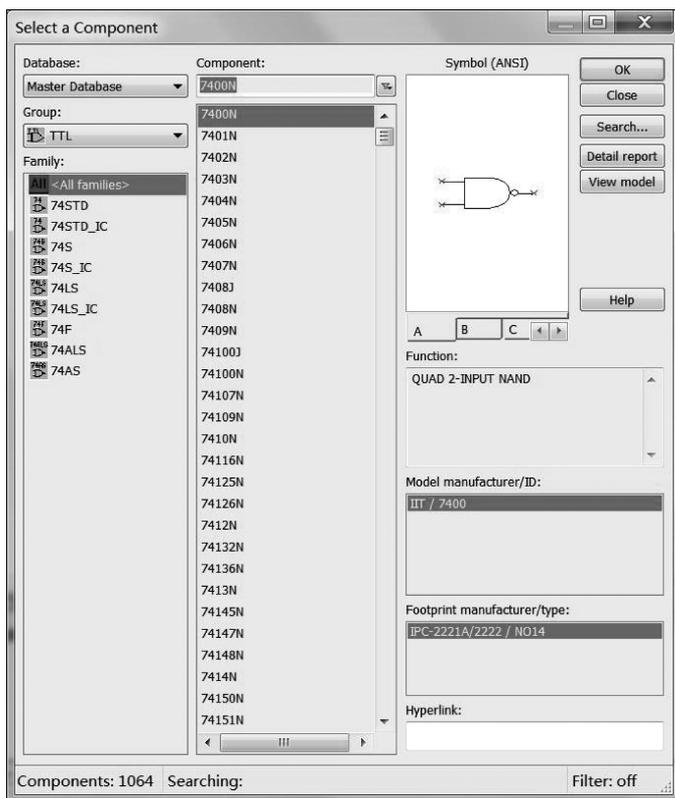


图 3-4 选择元件

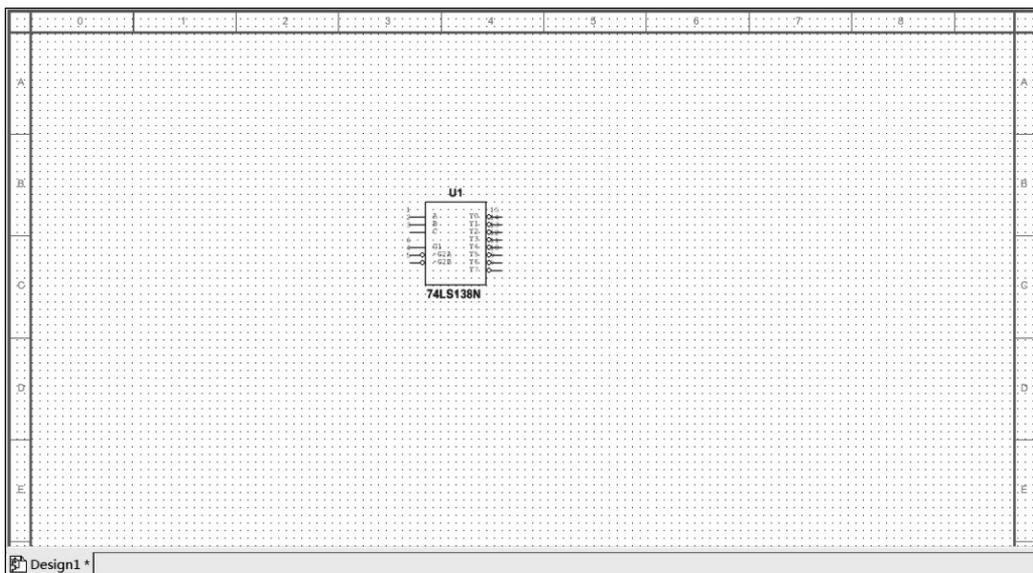


图 3-5 放置元件

双击此元件,会出现该元件设置对话框,如图 3-6 所示,可以设置元件的标签、编号、数值和模型参数等。



图 3-6 元件设置对话框

(3) 元件的移动。

选中元件,直接用鼠标拖曳要移动的元素。

(4) 元件的复制、删除与旋转。

选中元件,用相应的菜单、工具栏或右击鼠标弹出快捷菜单,进行需要的操作。

(5) 放置电源和接地元件。

单击“放置电源按钮”,弹出如图 3-7 所示对话框,可选择电源和接地元件。

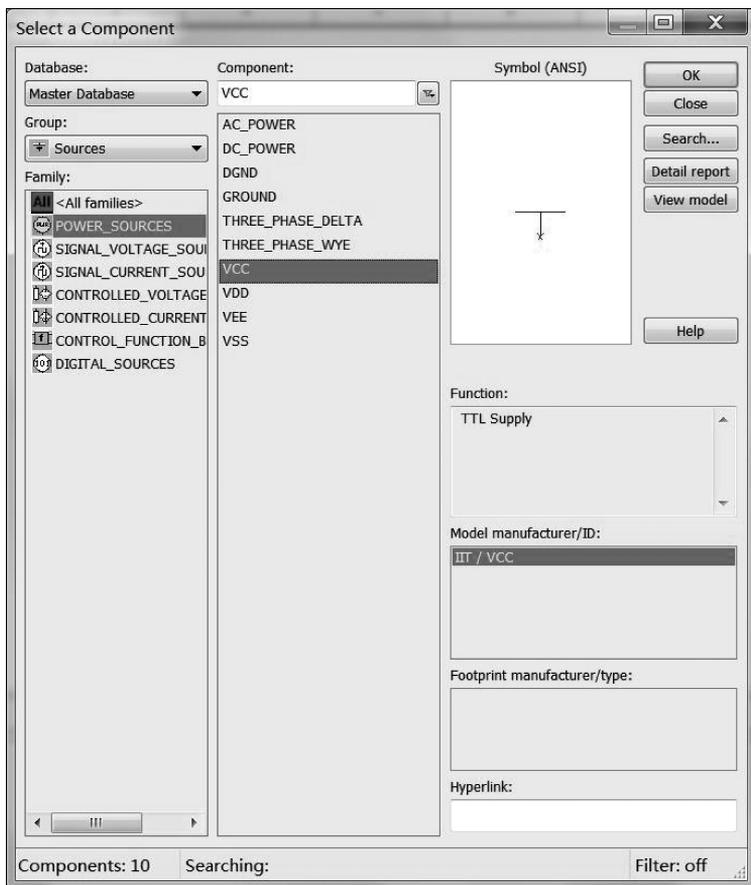


图 3-7 选择电源和接地元件

(6) 电路图中导线的操作。

① 连接。鼠标指向某元件的端点,出现小圆点后按下鼠标左键拖拽到另一个元件的端点,出现小圆点后松开左键。

② 删除。选定该导线,右击鼠标,在弹出的快捷菜单中单击“Delete”。

2. 使用虚拟仪表

如图 3-3 所示主设计窗口中,右侧竖排的为虚拟仪表工具栏,常用的仪表有数字万用表、函数发生器、示波器、波特图仪等,可根据需要选择使用。下面以万用表的选用为例进行说明。

(1) 调用数字万用表。

从指示部件库中选中数字万用表,按选择其他元件的方法放置在主电路图中,双击万用表符号,弹出参数设置对话框,如图 3-8 所示。

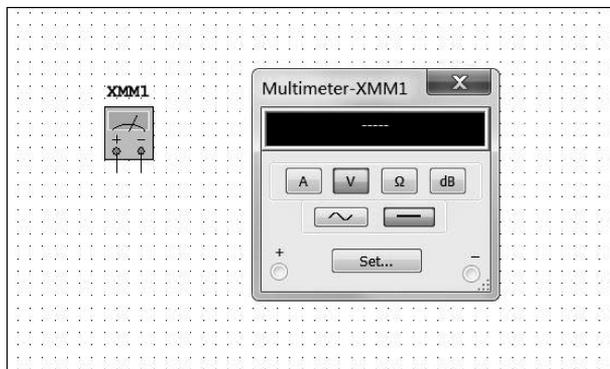


图 3-8 万用表的调用

(2) 万用表设置。

单击万用表设置对话框中的“设置”按钮,弹出如图 3-9 所示的万用表设置对话框,进行万用表参数及量程设置。上半部分为电气设置区,由上至下分别为电流表内阻、电压表内阻、电阻表电流、相对分贝值;下半部分为显示设置区,由上至下分别为电流表过量程、电压表过量程、电阻表过量程。

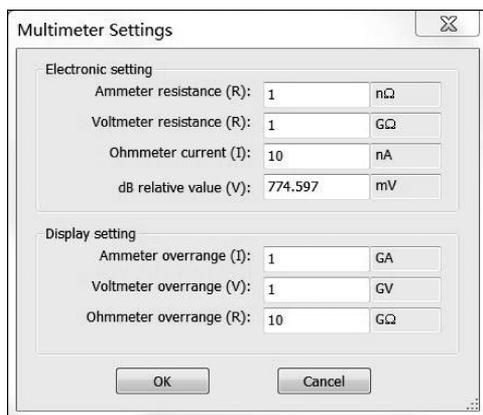


图 3-9 万用表参数及量程设置

其他仪表的使用与万用表类似,不再赘述。

3. 实时仿真

打开 Multisim 软件自带例程 SineWaveOscillator.ms12,该电路为正弦波振荡电路,如图 3-10 所示,左上角菜单栏下方是仿真开关,单击仿真开关,电路就开始进行实时仿真。

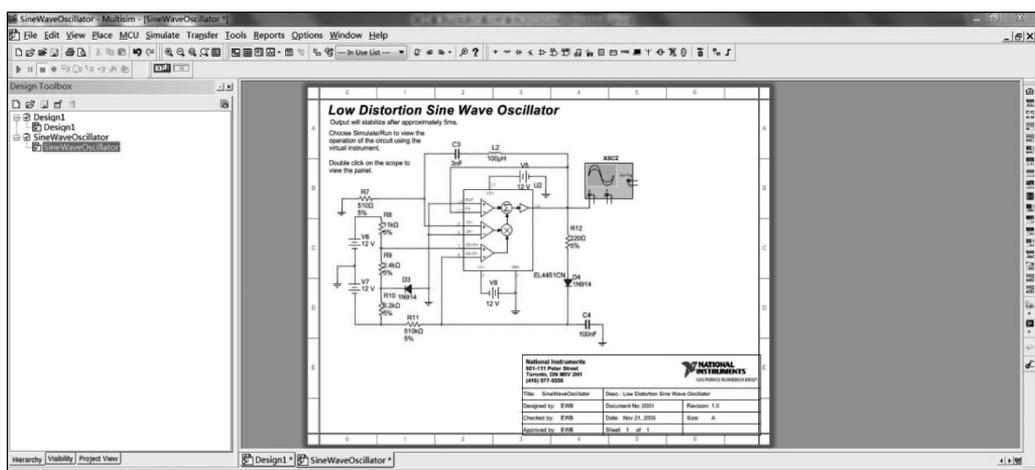


图 3-10 正弦波振荡电路

双击示波器图标,出现图 3-11 所示虚拟示波器波形显示界面,如果对波形不满意,可以调节 Timebase 数值以及 Channel A 和 Channel B 的 Scale 数值,即调节示波器时基和幅度显示比例,以输出理想波形。

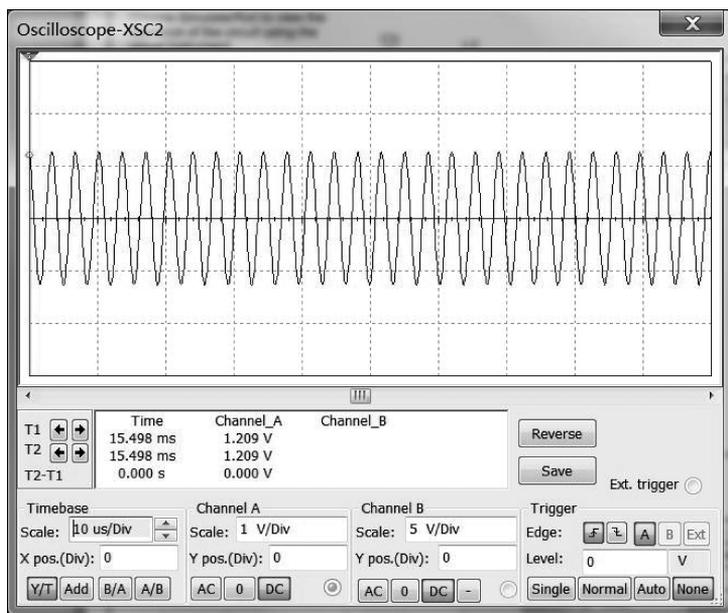


图 3-11 虚拟示波器显示正弦波振荡电路输出波形

4. 保存文件

电路图绘制完成,仿真结束后,执行菜单栏中的“文件/保存”可以自动按原文件名将该文件保存在原来的路径中。单击左上角菜单栏中的“文件/另存为”,弹出对话框

(图 3-12), 在对话框中选定保存路径, 也可以修改文件名保存。

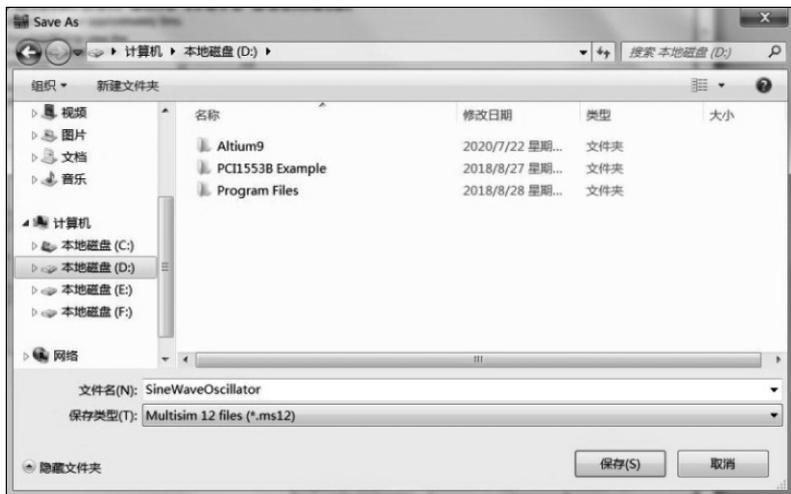


图 3-12 文件保存

思考题

1. 安装 Multisim 软件后, 实现本节示例电路的实时仿真过程。
2. 通过查看 NI 帮助文档或查找资料, 探究 Multisim 的使用技巧。

3.2 案例 1 电阻式传感器电桥电路分析



3.2.1 实践目标

- (1) 通过仿真案例学习, 掌握直流电桥电路的工作原理。
- (2) 掌握利用 Multisim 软件构建仿真电路的方法。
- (3) 掌握仿真电路参数扫描分析功能使用方法。

3.2.2 直流电桥工作原理

电阻应变片可将应变转换为电阻的变化量, 为了便于传输、显示和记录, 必须经过测量电路, 将电阻的变化转换为电压或电流信号, 最终实现应变量的测量。电阻的变化一般采用电桥电路来测量。

电桥是由电阻(或电感、电容)所组成的一个四端网络。图 3-13 为电阻元件组成的电桥电路。在测量电路中, 它的作用是将组成电桥各桥臂的电阻(或电感、电容)等参量的变化转换成电压或电流的输出。如果将组成桥臂的一个或数个电阻更换为电阻应变片,

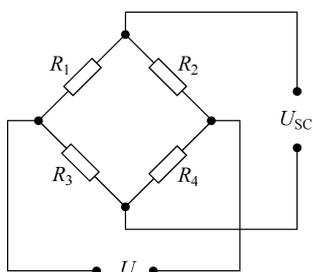


图 3-13 直流电桥电路

则构成应变测量电桥。

根据供桥电压的性质,测量电桥可分为直流电桥和交流电桥;按照测量方式的不同,测量电桥又可分为平衡电桥和不平衡电桥。下面介绍最常见的直流测量电桥(图 3-13)。

图 3-13 中, U 为电桥供给电压, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为各桥臂上应变片等效电阻, U_{SC} 为电桥输出电压,推导后可得

$$U_{SC} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (3-1)$$

根据式(3-1),可得电桥的平衡条件为 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 。

通过适当选择各桥臂的电阻值,使电桥初始状态处于平衡,工作时,各桥臂阻值变化分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 ,则输出电压

$$U_{SC} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) U \quad (3-2)$$

可见,电桥的输出电压 U_{SC} 与各桥臂电阻变化近似为线性关系,即把电阻变化转换成电压信号。实际工作中,一般根据电桥参与变化的桥臂数目分为半桥式和全桥式连接,如图 3-14 所示。

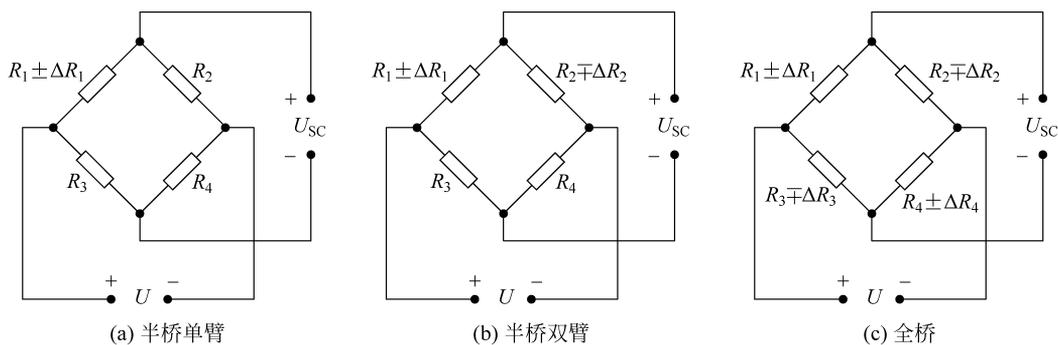


图 3-14 直流电桥的接桥方式和各臂极性

图 3-14(a)为半桥单臂连接,工作中只有 R_1 参与测量,即 $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$,若同时有 $\Delta R_1 = \Delta R$,则

$$U_{SC} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U \quad (3-3)$$

图 3-14(b)为半桥双臂连接,工作中有两个桥臂 R_1 、 R_2 参与测量,即 $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$,若同时有 $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R$,则

$$U_{SC} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} U \quad (3-4)$$

图 3-14(c)为全桥连接,工作中四个桥臂均参与测量,当 $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3 =$

$\Delta R_4 = \Delta R$, 且相对桥臂电阻变化极性相同时, 同理则有

$$U_{sc} = \frac{\Delta R}{R} U \quad (3-5)$$

3.2.3 直流电桥电路仿真分析

1. 仿真电路构建

首先简要说明元器件选取过程。

(1) 电源: Place source \rightarrow POWER_SOURCES \rightarrow DC_POWER, 选取电源并设置电压为 10V。

(2) 接地: Place source \rightarrow POWER_SOURCES \rightarrow GROUND, 选取电路中的接地。

(3) 电阻: Place Basic \rightarrow RESISTOR, 选取电阻值为 100Ω 的 4 个电阻。

(4) 电压表: Place Indicators \rightarrow VOLTMETER, 选取电压表并设置为直流挡。

然后构建如图 3-15 所示的直流电桥仿真电路。

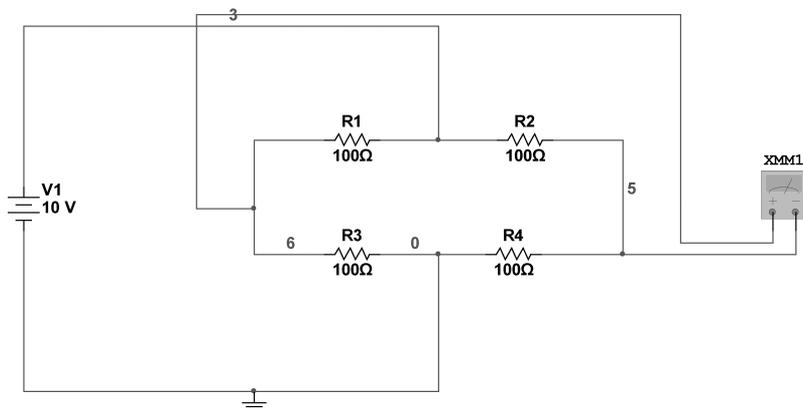


图 3-15 直流电桥仿真电路

2. 半桥单臂仿真

(1) 单击仿真开关, 激活电路。

(2) 将 $R_1 \sim R_4$ 均置为 100Ω 时, 此时电桥平衡, 理论输出值应为 0, XMM1 输出为 0V。

(3) 将 R_1 调整为 101Ω 时, 如图 3-16 所示, 其余电阻不变, 此时 XMM1 输出为 -24.876mV 。与式(3-3)的计算值 -25mV 基本一致。

3. 电路参数扫描分析

为了快速分析单臂电桥电阻改变对输出电压的影响, 可以采用软件自带的参数扫描 (Parameter Sweep) 分析功能。单击“Simulate”菜单中子菜单“Analyses”, 单击“Parameter

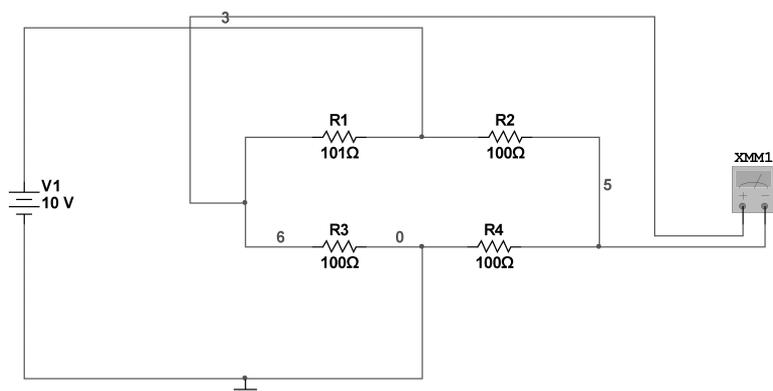


图 3-16 单臂阻值改变后的直流电桥

sweep”，出现图 3-17 所示功能设定界面，其中“Device type”即扫描器件类型为电阻 R1，扫描起始值为 101 Ω ，终值为 111 Ω ，增量为 1 Ω ，其余电阻不变，其他采用默认选择。

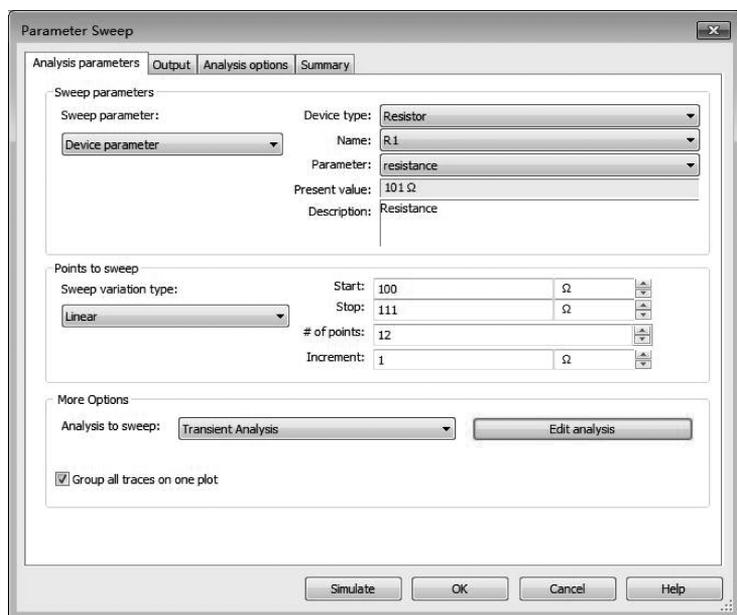


图 3-17 参数扫描设置对话框

设置完毕后，单击“仿真”按钮，则在 Graph View 中输出扫描结果，如图 3-18 所示。由图可知，桥臂其他电阻保持 100 Ω ，当 R1 变为 111 Ω 时，其输出为 -260.663mV。同样的条件下，根据式(3-3)，计算出的理论值为 -275mV，二者的差值接近 15mV。

4. 半桥双臂仿真

将 R1、R4 调整为 101 Ω 时，如图 3-19 所示，其余电阻不变，此时 XMM1 输出为 -49.751mV。与式(3-4)的计算值 -50mV 基本一致。

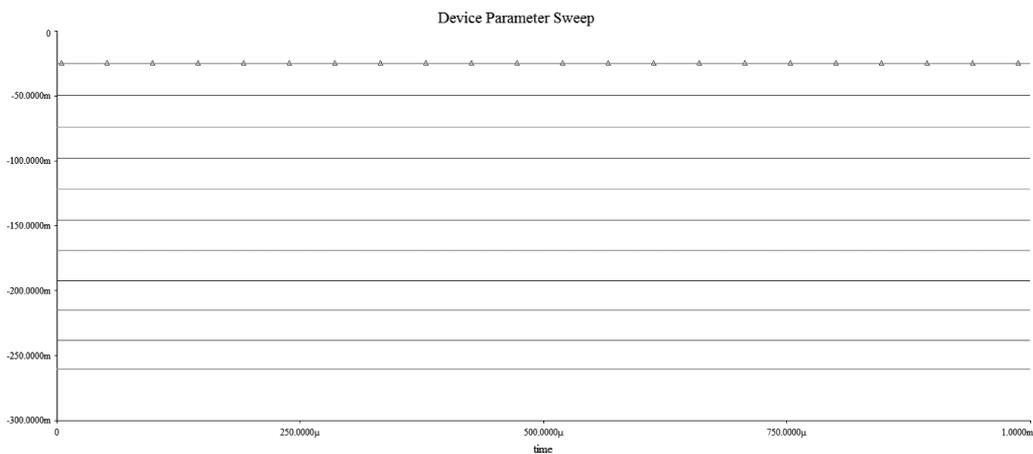


图 3-18 单臂阻值扫描输出结果图

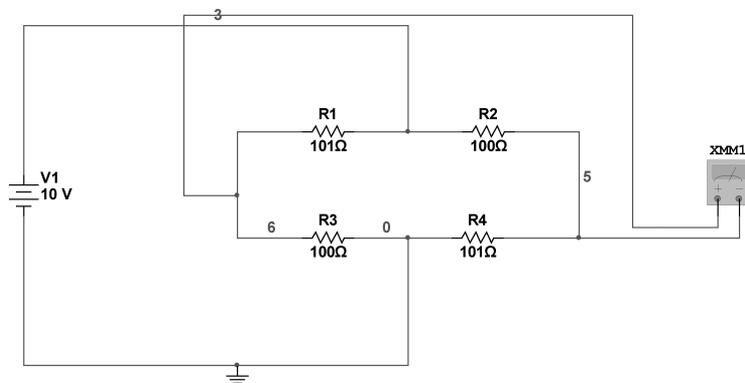


图 3-19 双臂阻值改变后的直流电桥

思考题

1. 利用本节提供的电桥仿真电路,继续进行全桥电路的仿真实验。
2. 在实验中可以发现,随着图 3-16 所示单臂电桥中单臂阻值的变化,电桥输出的理论值与仿真值差距增大,思考其原因。

3.3 案例 2 信号放大电路分析

3.3.1 实践目标

- (1) 通过仿真案例学习,掌握三种常用信号放大电路的基本工作原理。
- (2) 学会利用 Multisim 仿真软件分析和设计常用的信号放大电路。



3.3.2 常用信号放大电路工作原理

在测试系统中,常用的放大电路有比例运算放大电路和测量放大电路,其中前者是后者的基础,后者是前者的综合运用。比例运算电路是指电路的输出电压与输入电压存在比例关系,是最基本的运算电路。对于理想运放,只有在电路中引入了负反馈,才能保证集成运放工作于线性区。换言之,通常集成运放用于运算电路时,必须工作在线性区才能保证运算电路的有效性。

1. 反比例运算电路

图 3-20 为反比例运算电路,其输入电压 u_i 通过 R_1 接入运放的反相输入端, R_1 相当于信号源内阻。同相输入端通过电阻 R_p 接地, R_p 为补偿电阻,用来保证集成运放输入级差分放大电路的对称性, $R_p = R_1 // R_f$ 。输出电压 u_o 通过反馈电阻 R_f 送到运放的反相输入端,电路中引入的是电压并联负反馈。

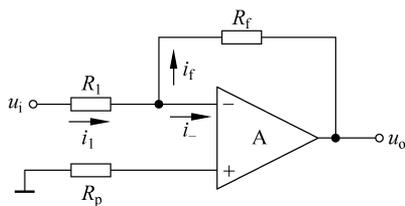


图 3-20 反向比例运算电路

根据理想运放工作在线性区具有“虚断”和“虚短路”的特性, $i_+ = i_- = 0, u_+ = u_-$,可知电阻 R_p 没有压降,则 $u_+ = 0$,可得

$$u_+ = u_- = 0 \quad (3-6)$$

集成运放两个输入端的电位均为零,称为“虚地”,“虚地”是反比例运算电路的重要特征。由于运放两输入端没有共模信号电压,因此对集成运放的共模参数要求较低。根据 $i_- = 0, u_- = 0$,所以输出电压与输入电压的关系为

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i \quad (3-7)$$

式(3-7)表明,电路的输出电压与输入电压成正比,负号表示输出信号与输入信号反相,故称为反比例运算电路。电路的电压放大倍数为

$$A = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3-8)$$

可见,反比例运算电路的电压放大倍数仅由外接电阻 R_f 与 R_1 之比来决定,与集成运放参数无关。

输入电阻:虽然理想运放的输入电阻为无穷大,但由于电路引入的是并联负反馈,因此反比例运算电路的输入电阻并不大。由于反相输入端“虚地”,根据输入电阻的定义,可得

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = R_1 \quad (3-9)$$

输出电阻:因为电路引入的是深度电压负反馈,并且 $1 + AF \rightarrow \infty$,所以输出电阻 $R_o = 0$ 。

2. 同相比例运算电路

图 3-21 为同相比例运算电路。根据“虚短”和“虚断”的概念得

$$u_+ = u_- = u_i \quad (3-10)$$

式(3-10)表明,集成运放有共模输入电压 u_i ,这是同相比例运算电路的主要特征。因此,设计同相比例运算电路时应选用共模抑制比高、最大共模输入电压大的集成运放。

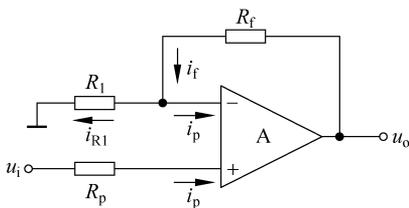


图 3-21 同相比例运算电路

因为净输入电流 $i_- = 0$,所以 $i_{R1} = i_f$,得 $u_i = u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o$,因此可得同相比例运算电路的电压放大倍数为

$$A = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (3-11)$$

式(3-11)表明,输出电压与输入电压成正比,并且相位相同,故称为同相比例运算电路。同相比例运算电路的放大倍数总是大于或等于 1。

该电路引入的是电压串联负反馈,故可认为输入电阻为无穷大,输出电阻为零。作为同相放大器的特例,若 $R_1 \rightarrow \infty, R_p \rightarrow 0$,则构成了电压跟随器,其特点是:对低频信号,其增益近似为 1,同时具有极高的输入阻抗和低输出阻抗,因此常在测试系统中用作阻抗变换器。

3. 测量放大器电路

在许多测试场合,传感器输出的信号往往很微弱,而且信号中包含很大的共模电压,一般对这种信号需要采用具有很高的共模抑制比、高增益、低噪声、高输入阻抗的放大器实现放大,通常将具有上述特点的放大器称为测量放大器,或称为仪表放大器。

图 3-22 是目前广泛应用的三运算放大器测量电路,其中 A1 和 A2 为两个输入阻抗、共模抑制比和开环增益均一致的通用集成运算放大器,工作于同相放大方式,构成了平衡对称的差动放大输入级;A3 工作于差动放大方式,用来进一步抑制 A1、A2 的共模信号,并接成单端输出方式适应接地负载的要求。

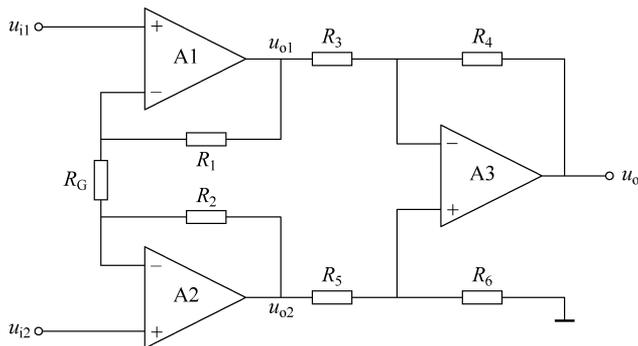


图 3-22 三运算放大器测量电路

根据反相放大和同相放大器结论,由电路结构分析可知

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_G}\right) u_{i1} - \frac{R_1}{R_G} u_{i2}$$

$$u_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_G}\right) u_{i2} - \frac{R_2}{R_G} u_{i1}$$

$$u_o = -\frac{R_4}{R_3} u_{o1} + \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{R_6}{R_5 + R_6} u_{o2}$$

通常电路中 $R_1=R_2, R_3=R_5, R_4=R_6$, 对差模输入电压 $u_{i1}-u_{i2}$, 测量放大器的增益为

$$A = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \quad (3-12)$$

测量放大器的共模抑制比主要取决于输入级运算放大器 A1、A2 的对称性、输出级运算放大器 A3 的共模抑制比和输出级外接电阻 $R_3、R_5$ 及 $R_4、R_6$ 的匹配精度 ($\pm 0.1\%$ 以内), 一般共模抑制比可达 120dB 以上。

此外, 测量放大器电路还具有增益调节功能, 通过调节可以改变增益而不影响电路的对称性, 而且由于输入级采用了对称的同相放大器, 输入电阻可达数百兆欧以上。

3.3.3 反相运算放大电路仿真分析

构建如图 3-23 所示的反相放大仿真电路, 简要步骤如下:

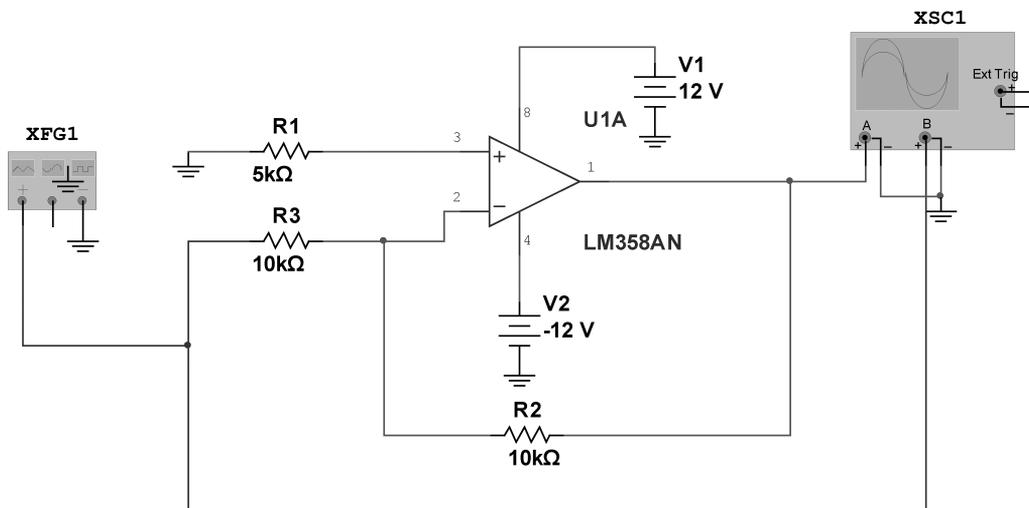


图 3-23 反相运算放大电路

(1) 电源: Place Source→POWER_SOURCES→DC_POWER, 选取电源并设置电压为 12V、-12V。

(2) 接地: Place Source→POWER_SOURCES→GROUND, 选取电路中的接地。

(3) 电阻: Place Basic→RESESTOR, 选取电阻值为 2 个 10 k Ω 、1 个 5 k Ω 的 3 个电阻。

(4) 运算放大器: Pace Analog-OPAMP, 选取 LM358AN。

(5) 信号发生器: 从虚拟仪器工具栏调取 XFG1。

XFG1 输出设定为 1kHz 的正弦信号, VPP 为 4V, 输出信号接入示波器 A 通道, 输入信号接入 B 通道, 单击仿真开关, 激活电路, 单击虚拟示波器 XSC1, 获得如图 3-24(a) 所示的仿真结果。输入信号与输出信号的相位相反, 相差 180°, 但幅度相同, 即放大倍数为 1。根据式(3-7)、式(3-8), 该电路放大倍数为 1, 但输入、输出信号相位相反, 因此, 理论计算结果与仿真结果相符合。

将电路中 R2 的阻值改为 20k Ω , 其他仿真条件不变, 单击仿真开关, 激活电路, 单击虚拟示波器 XSC1, 获得如图 3-24(b) 所示仿真结果。根据式(3-7)、式(3-8), 此时电路放大倍数为 2, 输入、输出信号相位相反, 理论计算结果与仿真结果相符合。

3.3.4 同相运算放大电路仿真分析

构建如图 3-25 所示的同相运算放大电路。

XFG1 输出设定为 1kHz 的正弦信号, VPP 为 10V, 输出信号接入示波器 A 通道, 输入信号接入 B 通道, 单击仿真开关, 激活电路, 单击虚拟示波器 XSC1, 获得如图 3-26 所示的仿真结果。由图 3-26 可见, 输入信号与输出信号同相, 幅值相差 1 倍, 与通过式(3-11)所得的理论计算结果一致。

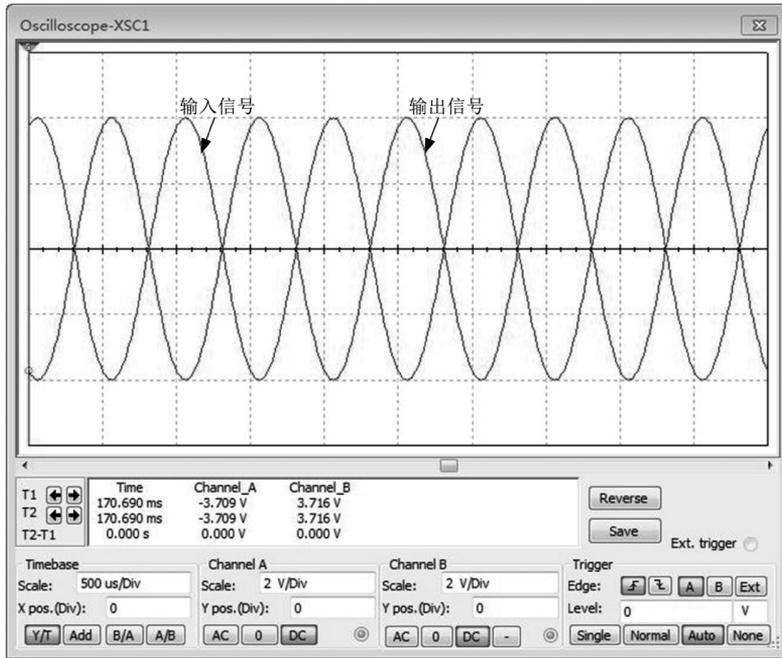
3.3.5 测量放大电路仿真分析

构建如图 3-27 所示的测量放大电路。

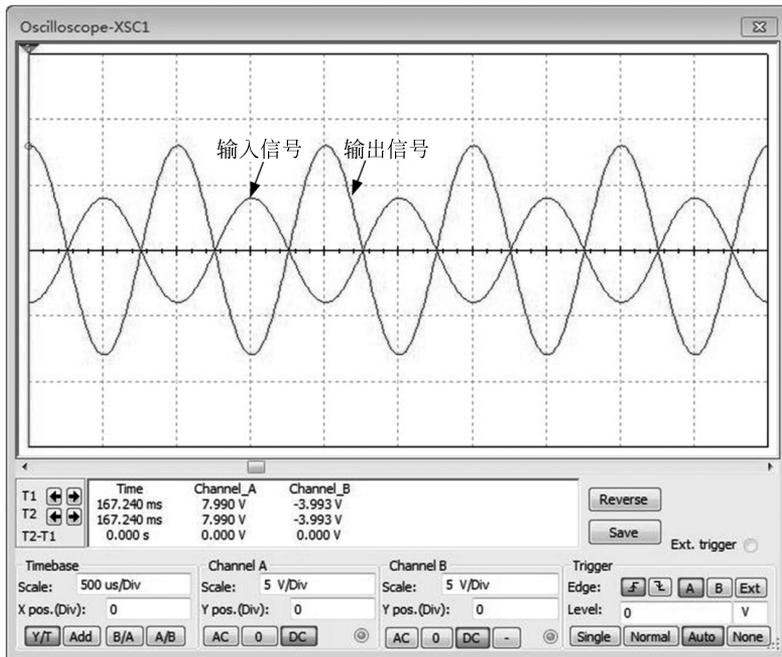
XFG1 输出设定为 1kHz 的正弦信号, VPP 为 4V, 输出信号接入示波器 A 通道, 输入信号接入 B 通道, 单击仿真开关, 激活电路, 单击虚拟示波器 XSC1, 获得如图 3-28 所示仿真结果。由图 3-28 可见, 输入信号与输出信号反相, 幅值相差 1 倍, 与通过式(3-12)所得的理论值相同。

思考题

1. 利用参数扫描功能, 分析反相放大电路中的平衡电阻值对输出有无影响, 并思考其原因。
2. 利用参数扫描功能, 分析测量放大电路中如果 R_3 、 R_5 不匹配, 会出现什么情况?
3. 查阅同相加法电路和减法电路的资料, 改进本节案例中提供的仿真电路, 实现同相加法电路和减法电路的功能仿真。



(a) 放大倍数为1



(b) 放大倍数为2

图 3-24 反相运算放大电路输入、输出信号

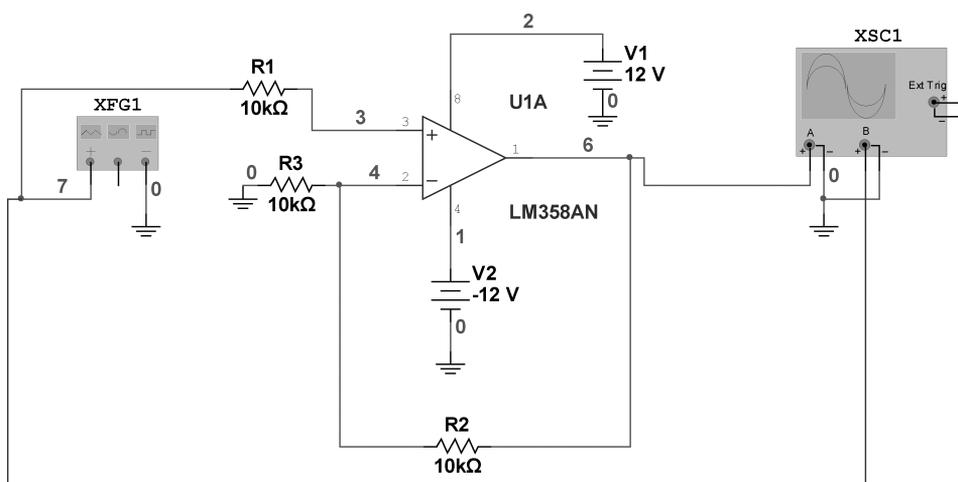


图 3-25 同相运算放大电路

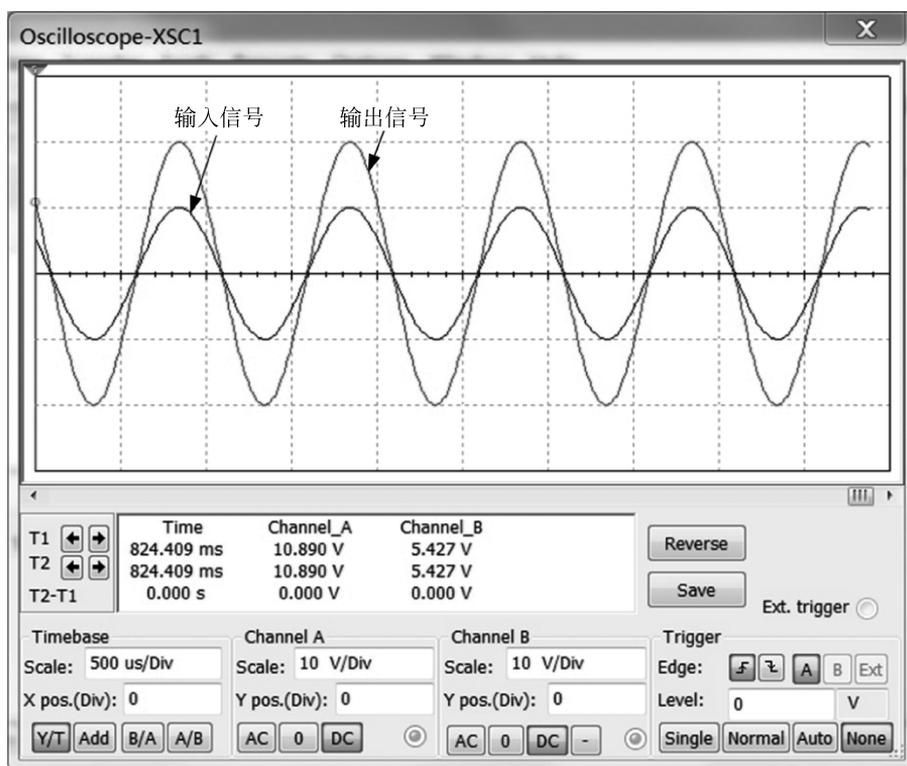


图 3-26 同相运算放大电路输入、输出信号

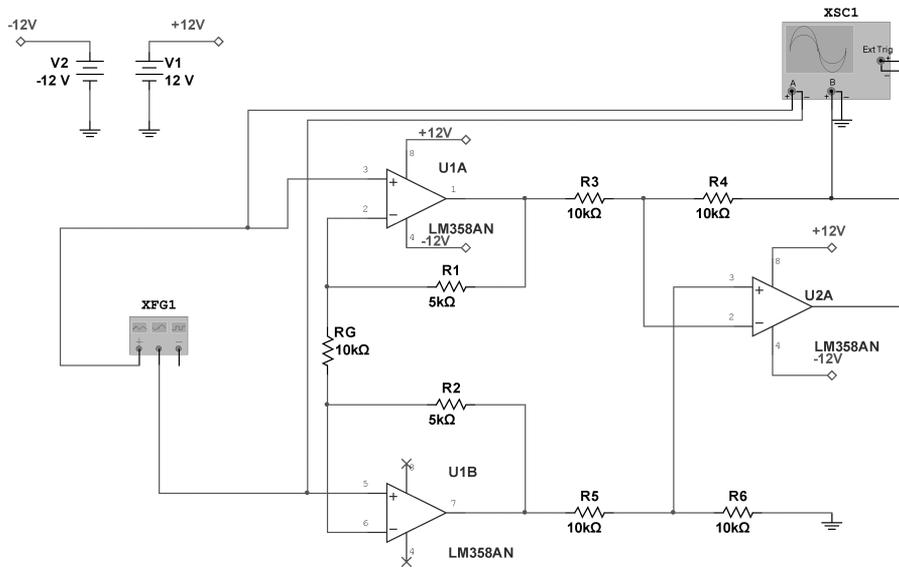


图 3-27 测量放大电路

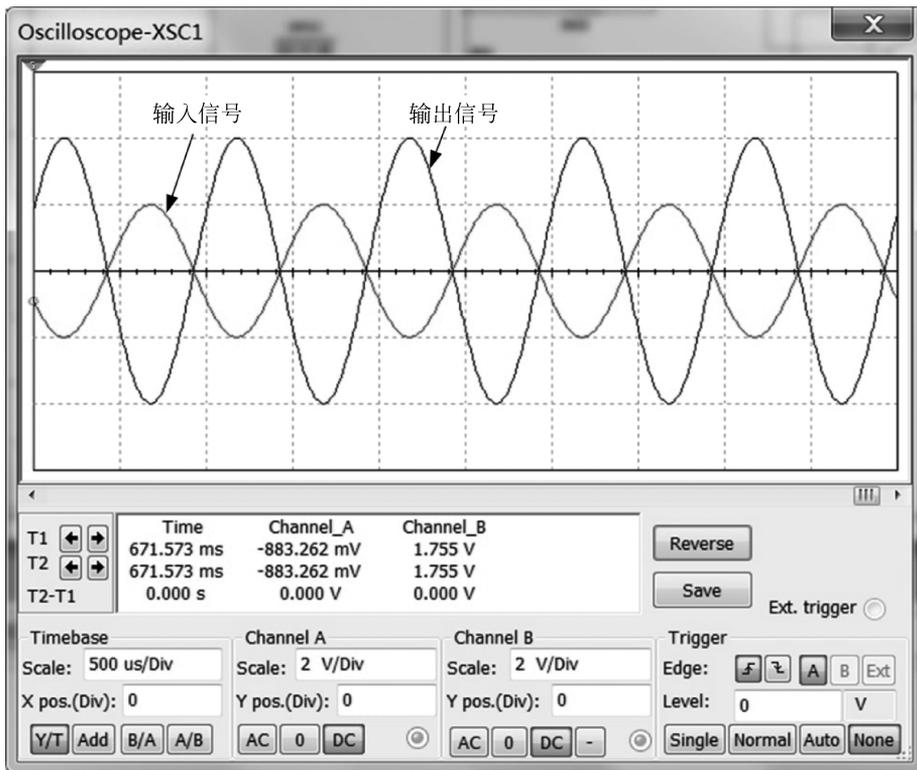


图 3-28 测量放大电路输入、输出信号

3.4 案例3 滤波器电路分析



3.4.1 实践目标

- (1) 通过仿真案例学习,掌握低通、高通、带通滤波器基本概念和电路实现方法。
- (2) 通过一阶和二阶、无源和有源滤波器的仿真结果对比,掌握各型无源和有源滤波器的优缺点。

3.4.2 滤波器电路工作原理

在测试系统中,除了信号放大电路,很多情况下由于信号会被噪声污染,需要对信号进行滤波处理,去除噪声,提高信噪比。承担这一功能的电路就是滤波器电路,是测试系统前向通道中不可省略的环节。

1. 基本概念

滤波器的种类繁多,根据滤波器的选频作用,一般将滤波器分为四类,即低通、高通、带通和带阻滤波器;根据构成滤波器的元件类型,可分为RC、LC或晶体谐振滤波器;根据构成滤波器的电路性质,可分为有源滤波器和无源滤波器;根据滤波器所处理的信号性质,分为模拟滤波器和数字滤波器。

1) 低通滤波器

如图3-29(a)所示,频率为 $0 \sim f_1$,幅频特性平直,它可以使信号中低于 f_1 的频率成分几乎不受衰减地通过,而高于 f_1 的频率成分受到极大衰减。

2) 高通滤波器

如图3-29(b)所示,与低通滤波相反,频率为 $f_1 \sim +\infty$,其幅频特性平直。它使信号中高于 f_1 的频率成分几乎不受衰减地通过,而低于 f_1 的频率成分将受到极大衰减。

3) 带通滤波器

如图3-29(c)所示,它的通频带在 $f_1 \sim f_2$ 之间。它使信号中高于 f_1 而低于 f_2 的频率成分可以不受衰减地通过,而其他成分受到衰减。

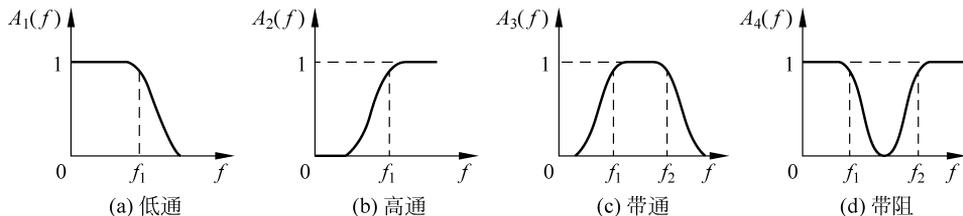


图3-29 四种滤波器的幅频特性

4) 带阻滤波器

与带通滤波相反,阻带在频率 $f_1 \sim f_2$ 之间。它使信号中高于 f_1 而低于 f_2 的频率成分受到衰减,其余频率成分的信号几乎不受衰减地通过,如图 3-29(d)所示。

低通滤波器和高通滤波器是滤波器的两种最基本的形式,其他的滤波器都可以分解为这两种类型的滤波器。

四种滤波器在通带与阻带之间都存在一个过渡带,其幅频特性是一条斜线,在此频带内,信号受到不同程度的衰减。这个过渡带是滤波器所不希望的,但也是不可避免的。

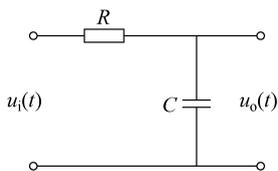
2. 无源 RC 滤波器

无源 RC 滤波器电路简单,抗干扰性强,有较好的低频性能,选用标准阻容元件,容易实现,因此检测系统中有较多的应用。

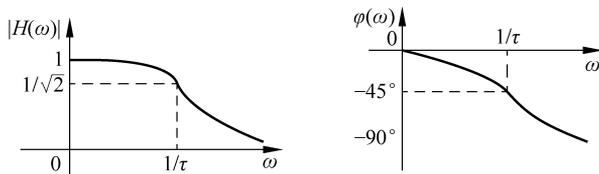
1) 一阶 RC 低通滤波器

RC 低通滤波器的典型电路及其幅频、相频特性如图 3-30 所示。设滤波器的输入信号电压为 u_i ,输出信号电压为 u_o ,电路的微分方程为

$$RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (3-13)$$



(a) RC低通滤波器电路



(b) 幅频、相频响应

图 3-30 RC 低通滤波器

令 $\tau = RC$, τ 称为时间常数。对式 (3-13) 进行傅里叶变换,可得频率特性、幅频响应、相频响应表达式为

$$H(\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1}, \quad A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (3-14)$$

这是一个典型的一阶系统。当 $\omega \ll \frac{1}{\tau}$ 时,幅频特性 $A(\omega) \approx 1$,此时信号几乎不受衰减地通过,并且 $\varphi(\omega) - \omega$ 关系为近似于一条通过原点的直线。因此,可以认为,在此种情况下,RC 低通滤波器是一个不失真的传输系统。

当 $\omega = \omega_1 = \frac{1}{\tau}$ 时, $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 即

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-15)$$

此式表明, RC 值决定着截止频率。因此, 适当改变 RC 数值时, 就可以改变滤波器的截止频率。

2) RC 高通滤波器

图 3-31 所示为高通滤波器及其幅频、相频特性。设输入信号电压为 u_i , 输出信号电压为 u_o , 则微分方程式为

$$u_o(t) + \frac{1}{RC} \int_0^t u_o(t) dt = u_i(t) \quad (3-16)$$

同理, 令 $RC = \tau$, 高通滤波器频率响应、幅频特性和相频特性为

$$H(\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}, \quad A(\omega) = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad \varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{1}{\omega\tau}\right) \quad (3-17)$$

当 $\omega = \omega_1 = \frac{1}{\tau}$ 时, $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 滤波器的 -3dB 截止频率为

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-18)$$

当 $\omega \gg \frac{1}{\tau}$ 时, $A(\omega) \approx 1, \varphi(\omega) \approx 0$ 。即当 ω 相当大时, 幅频特性趋于 1, 相频特性趋于 0, 此时 RC 高通滤波器可视为不失真传输系统。

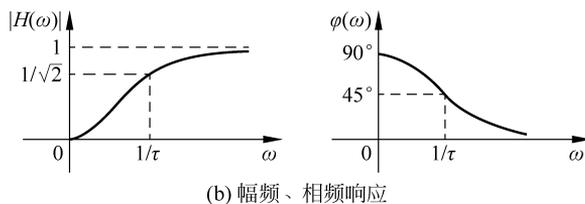
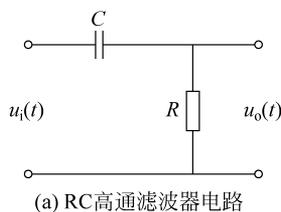


图 3-31 RC 高通滤波器

3) RC 带通滤波器

带通滤波器可以看作低通滤波器和高通滤波器的串联, 其电路如图 3-32 所示。其幅频特性为

$$A(\omega) \approx \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1+(\omega\tau_1)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau_2)^2}}, \quad \text{其中 } \tau_1 = R_1C_1, \tau_2 = R_2C_2 \quad (3-19)$$

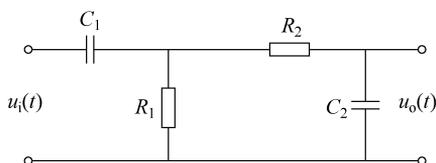


图 3-32 RC 带通滤波器电路

显然,带通滤波器的幅频特性相当于一个低通滤波器和高通滤波器串联,使得极低和极高的频率成分都完全被阻挡而不能通过,只有位于频率通带内的信号频率成分才能通过。

需要注意的是,当高通、低通滤波器两级串联时,应消除两级耦合时的相互影响,因为后一级成为前一级的“负载”,而前一级又是后一级的信号源内阻。实际上,两级间常用射极输出器或者用运算放大器进行隔离,因此实际的带通滤波器常常是有源的。

3. 有源滤波器

1) 一阶有源滤波器

前面所介绍的 RC 滤波器仅由电阻、电容无源元件构成,通常称之为无源滤波器。一阶无源滤波器过渡带衰减缓慢,选择性不佳,虽然可以通过串联无源的 RC 滤波器以提高阶次,增加在过渡带的衰减速度,但受级间耦合的影响,效果是互相削弱的,而且信号的幅值也将逐渐减弱。为了克服这些缺点,需要采用有源滤波器。

有源滤波器采用 RC 网络和运算放大器组成,其中运算放大器是有源器件,既可起到级间隔离作用,又可起到对信号的放大作用;而 RC 网络则通常作为运算放大器的负反馈网络,如图 3-33 所示。图 3-33(a)所示为一阶同相有源低通滤波器,它将 RC 无源低通滤波器接到运放的同相输入端,运放起隔离、控制增益和提高带负载能力作用,其截止频率 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$,放大倍数 $K = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 。

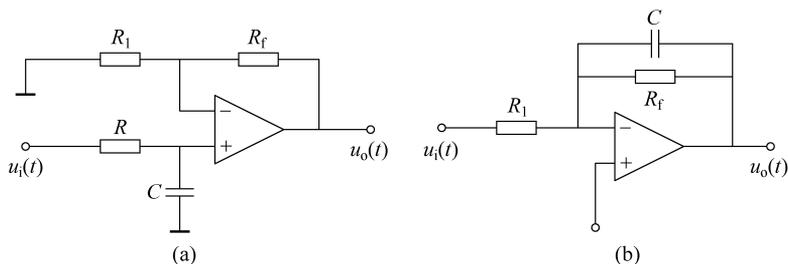


图 3-33 一阶有源低通滤波器

图 3-33(b)所示为一阶反相有源低通滤波器,它将高通网络作为运算放大器的负反馈,结果得到低通滤波特性,其截止频率 $f_c = \frac{1}{2\pi R_f C}$,放大倍数 $K = -\frac{R_f}{R_1}$ 。

一阶有源滤波器虽然在隔离、增益性能方面优于无源网络,但是它仍存在着过渡带衰减缓慢的严重弱点,所以就需寻求过渡带更为陡峭的高阶滤波器。

2) 二阶有源低通滤波器

把较为复杂的 RC 网络与运算放大器组合就可以得到二阶有源滤波器。这种滤波器有多路负反馈型、压控电压源型和状态变量型等几种类型,其设计方法详见相关文献。

3.4.3 低通滤波器电路仿真分析

1. 一阶低通滤波器仿真分析

构建如图 3-34 所示的一阶无源低通滤波器电路。输入信号选择峰值为 1V 的 1kHz 正弦信号,输出信号时域波形采用虚拟示波器 XSC1 来观察。XMM1 和 XMM2 为测量滤波器输入、输出信号有效值的电压表。

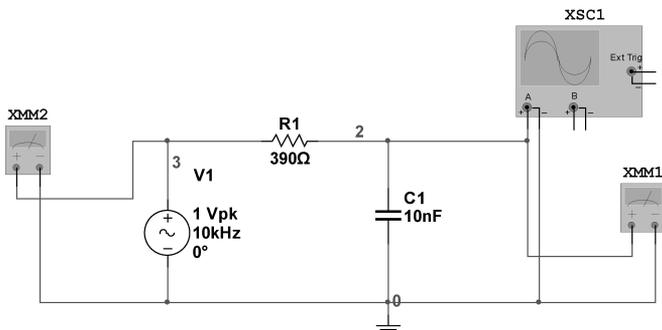


图 3-34 一阶无源低通滤波器电路

为了从频域的角度分析滤波器的性能,本节采用 Multisim 软件中的频率响应(AC Analysis)分析功能。应用该功能时,先单击“Simulate”菜单,再打开“Analysis”子菜单,最后单击“AC Analysis”,即可进入其设置对话框,如图 3-35 所示。在“Frequency Parameters”页面设置扫频范围,如本例中是 1Hz~10MHz。在“Output”页面设置输出变量,如本例中是 V(2),即滤波器输出端口的电压值。其他参数采用系统默认。

设置完毕后,单击频率响应分析设置对话框上的“Simulate”按钮,可以得到低通滤波器的幅频、相频响应图(图 3-36)。

根据式(3-15)计算可得,滤波器的截止频率 $f_c = 40\text{kHz}$ 。由图 3-36 可知,其截止频率为 $40\text{kHz}(-3\text{dB})$,对应的相位为 -45° ,与理论计算结果相符合。当频率增加到 4MHz ,幅度对应 -40dB ,相位为 -90° 。因此,此滤波器通带为 $0 \sim 40\text{kHz}$,过渡带约为 4MHz 。

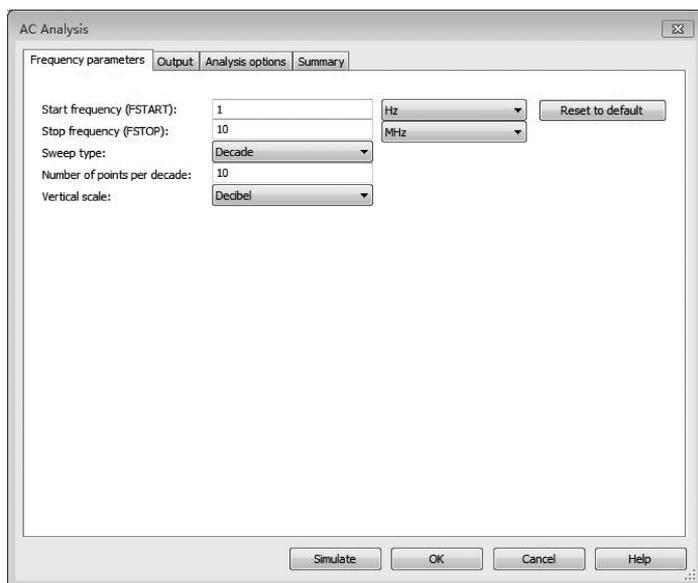


图 3-35 频率响应分析设置对话框

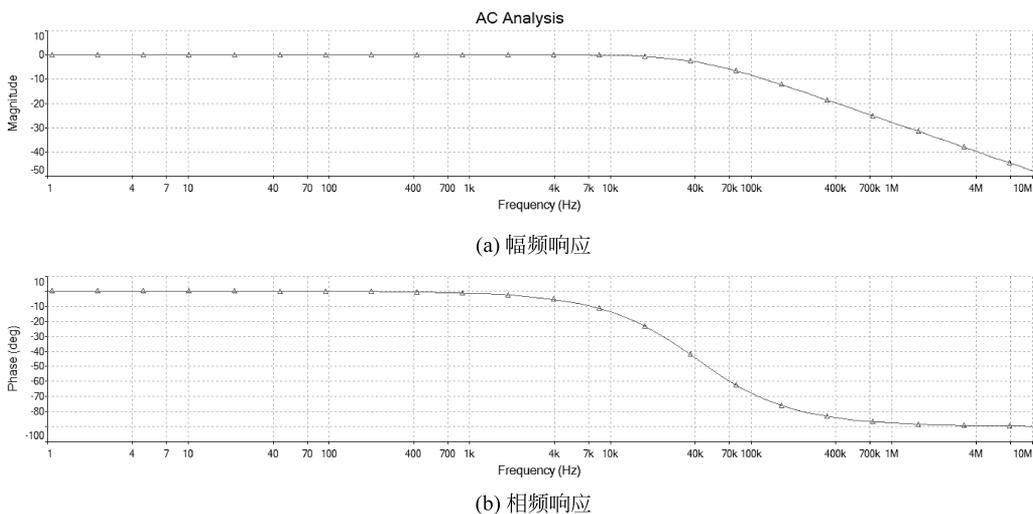


图 3-36 一阶无源低通滤波器频率特性

2. 二阶无源低通滤波器仿真分析

构建如图 3-37 所示的二阶无源低通滤波器电路,其实它相当于两个图 3-34 所示的一阶低通滤波器串联。

频率响应如图 3-38 所示,其截止频率在 12kHz,输出为 -3dB ,对应相位 -45° ,当输入频率为 400kHz 时,其输出为 -40dB ,对应相位 -163° 。因此该二阶滤波器的通带为 $0\sim 12\text{kHz}$ 。

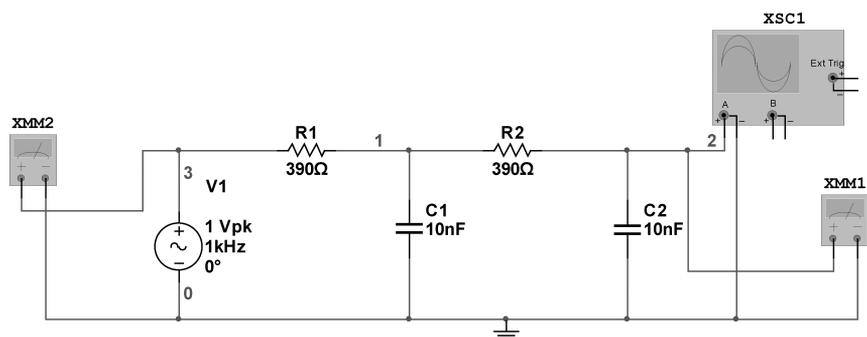
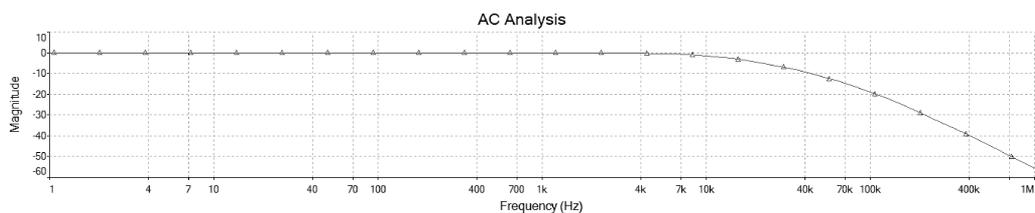
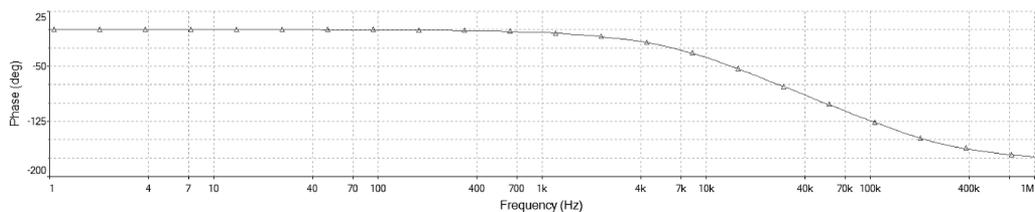


图 3-37 二阶无源低通滤波器电路



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

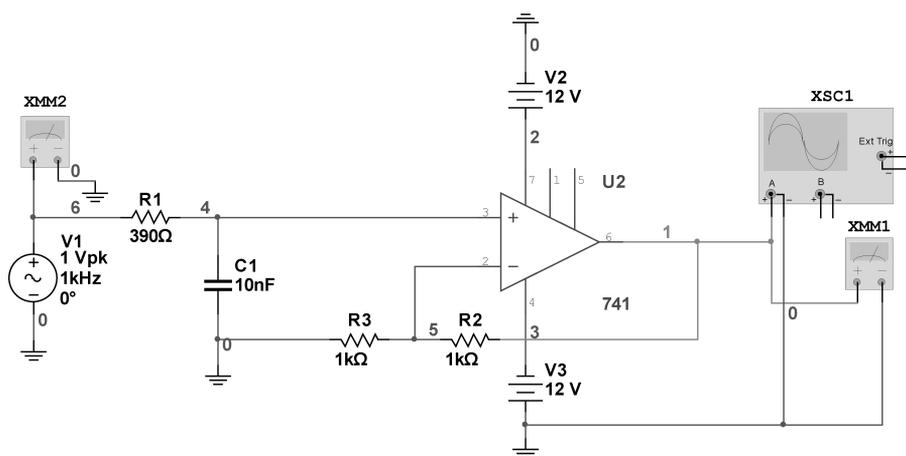
图 3-38 二阶无源低通滤波器的频率响应

对比图 3-36 与图 3-38 可得如下结论：二阶滤波器通带为 12kHz，比一阶滤波器的 40kHz 略窄；二阶滤波器过渡带宽度由一阶滤波器的 4MHz 缩短到 400kHz；二阶滤波器的相位延迟大于一阶滤波器；无论一阶或者二阶，在频率小于 1kHz 时，低通滤波器的相位延迟约为 0° ，此时的幅频响应为 1，因此在 $0\sim 1\text{kHz}$ 频段内，二者均相当于无失真传输系统。

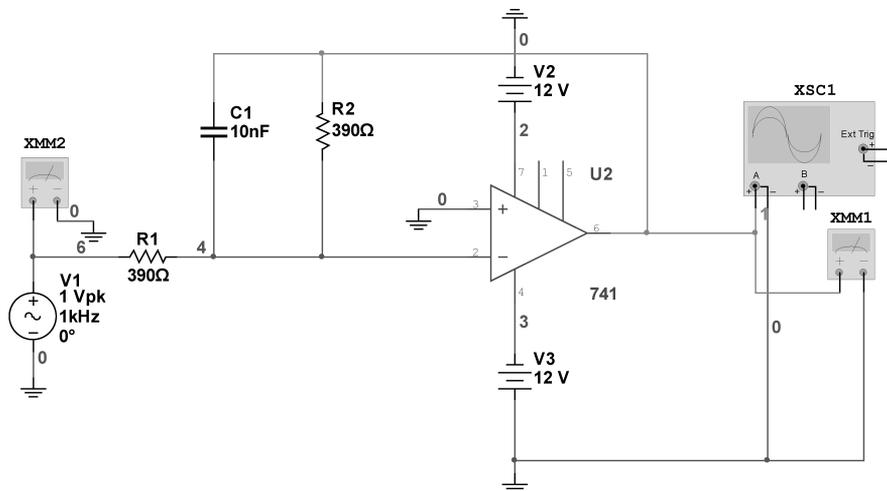
3. 一阶有源低通滤波器仿真分析

对图 3-34 所示电路按照图 3-33(a)、(b) 的电路拓扑结构改造一下，构建一阶有源滤波器电路，如图 3-39(a)、(b) 所示。

一阶有源同相低通滤波器频率响应如图 3-40 所示，滤波器截止频率为 40kHz，对应幅度输出为 -3dB ，相位约 -50° ，当输入频率为 2MHz 时，对应幅度输出约为 -40dB ，对应相位 -105° ，因此该滤波器的通带为 $0\sim 40\text{kHz}$ 。一阶有源反相低通滤波器频率响应如图 3-41 所示，滤波器截止频率为 40kHz，对应幅度输出为 -3dB ，相位约为 132° ，当输入频



(a) 同相低通滤波器



(b) 反相低通滤波器

图 3-39 一阶有源低通滤波器电路

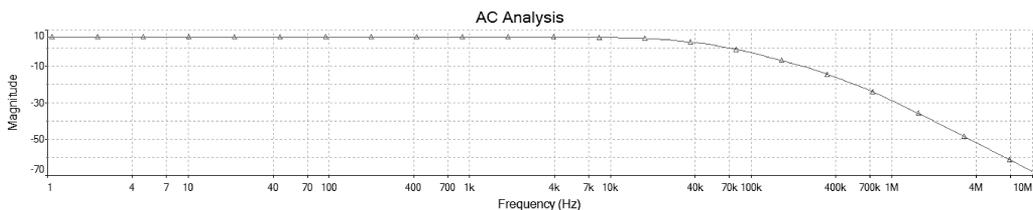
率为 700kHz 时,对应幅度输出约为 -20dB ,对应相位 50° ,因此该滤波器的通带也为 $0\sim 40\text{kHz}$ 。

按照图 3-33 对应两种一阶有源滤波器,其截止频率理论计算值均为 40kHz ,理论结果与图 3-40 和图 3-41 仿真结果相符合。

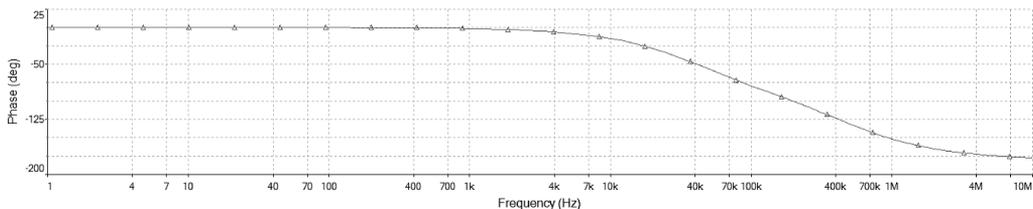
对比图 3-34 与图 3-41 低通滤波器的仿真结果可知,有源滤波器、无源滤波器的截止频率均为 40kHz ,但有源滤波器的过渡带明显短于无源低通滤波器。图 3-39(b)所示有源滤波器的运放反馈通路中有电容,具有高通作用,滤波器相位为正值。

4. 二阶有源低通滤波器仿真分析

保持电容 C 和电阻 R 的数值不变,构建压控电压源型二阶有源低通滤波器电路

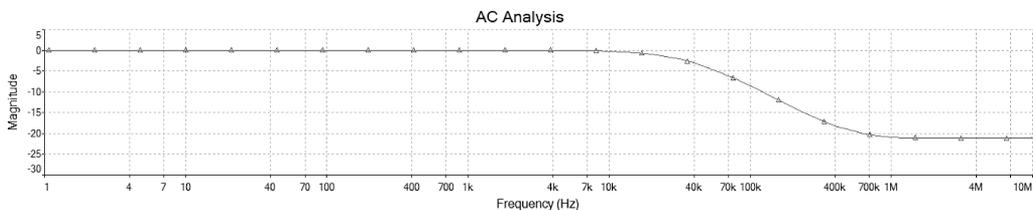


(a) 幅频响应

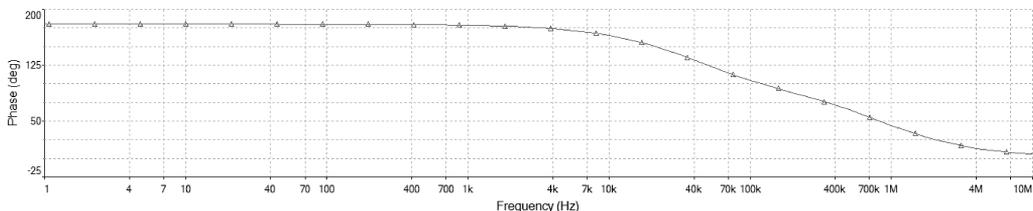


(b) 相频响应

图 3-40 一阶有源同相低通滤波器的频率响应



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图 3-41 一阶有源反相低通滤波器的频率响应

(图 3-42),相关内容可参考相关文献。

频率响应如图 3-43 可知,滤波器截止频率为 26kHz,对应幅度输出为 -3dB ,相位约为 -66° ,当输入频率为 320kHz 时,对应幅度输出约为 -31dB ,对应相位为 106° ,因此该滤波器的通带为 $0\sim 26\text{kHz}$ 。

通过对比前面的一阶有源滤波器和无源滤波器仿真结论可知,二阶有源低通滤波器能有效使得过渡带变窄,与理想特性低通滤波器更接近。因此,在测试系统中,对于低通滤波器,只要条件允许,应该优先选择采用二阶有源低通滤波器。

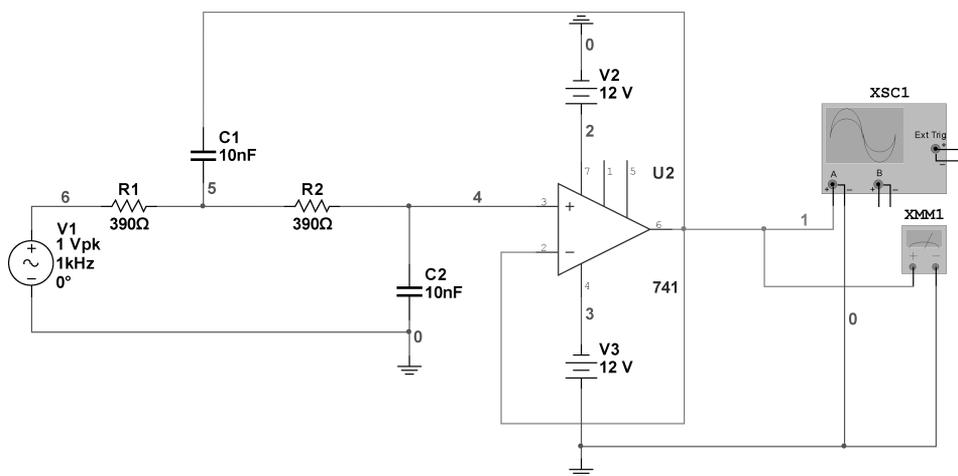
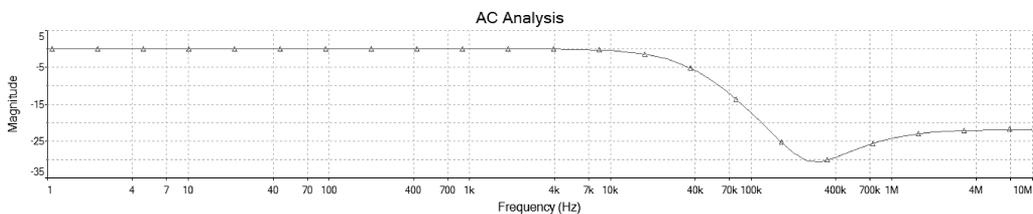
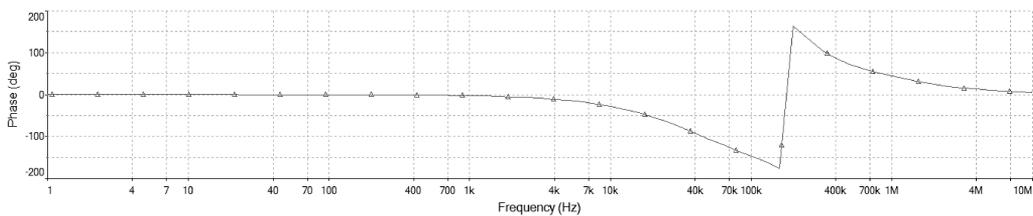


图 3-42 二阶有源低通滤波器电路



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图 3-43 二阶有源低通滤波器的频率响应

3.4.4 高通滤波器电路仿真分析

1. 无源高通滤波器仿真分析

构建如图 3-44 所示的二阶无源高通滤波器电路。

图 3-44 二阶无源高通滤波器的频率响应如图 3-45 所示,其截止频率在 13kHz 左右,幅值输出 -3dB,对应相位 45° ,当输入频率为 15kHz 时,幅值输出为 -20dB。当频率远大于 100kHz 时,其相位为 0° 。仿真分析结果与 3.4.2 节中关于高通滤波器的结论一致。

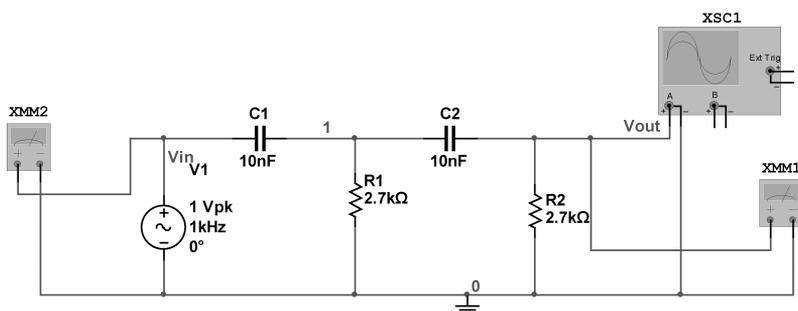
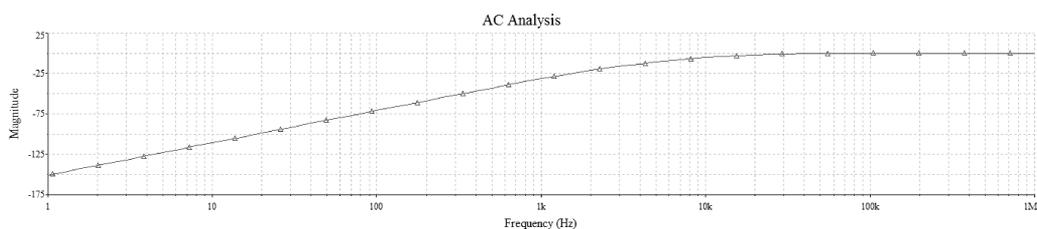
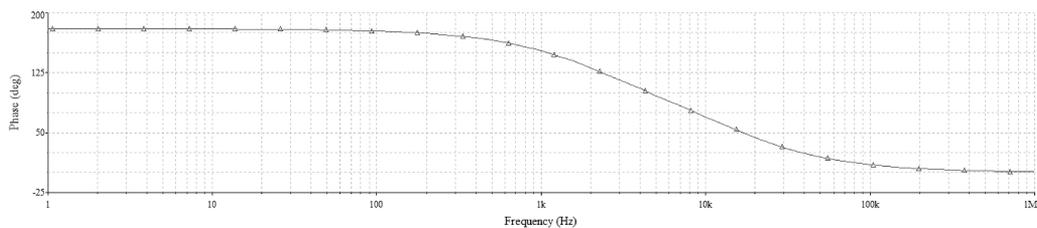


图 3-44 二阶无源高通滤波器电路



(a) 幅频响应



(b) 相频响应

图 3-45 二阶无源高通滤波器的频率响应

2. 有源高通滤波器仿真分析

构建如图 3-46 所示的压控电压型二阶有源高通滤波器电路。

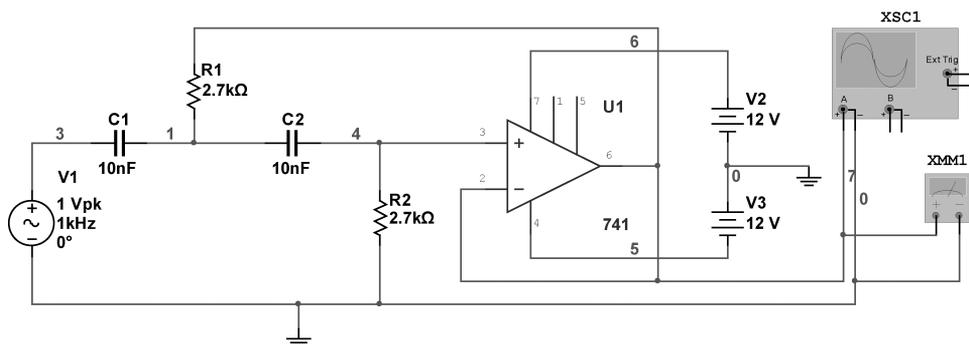


图 3-46 二阶有源高通滤波器电路

频率响应如图 3-47 所示,其截止频率在 9kHz、977kHz(-3dB 点),对应的相位为 45° 和 -45° 。当输入频率为 2kHz、10MHz 时,其输出为 -20dB,因此可以认为此滤波器的通带为 9~977kHz。与无源高通滤波器相比,通带宽度变窄。这是由于运算放大器本身具有一定的通带,相当于一个低通滤波器与高通滤波器串联。因此,在实际工作中,选择高通滤波器不同于低通滤波器,应优先选择无源高通滤波器。

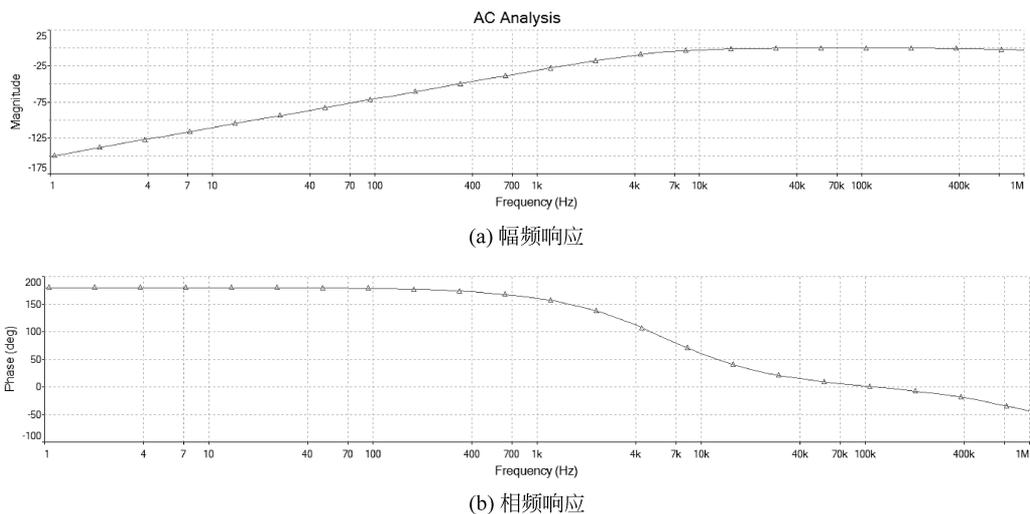


图 3-47 二阶有源高通滤波器的频率响应

3.4.5 带通滤波器电路仿真分析

1. 无源带通滤波器仿真分析

构建如图 3-48 所示的无源带通滤波器电路。

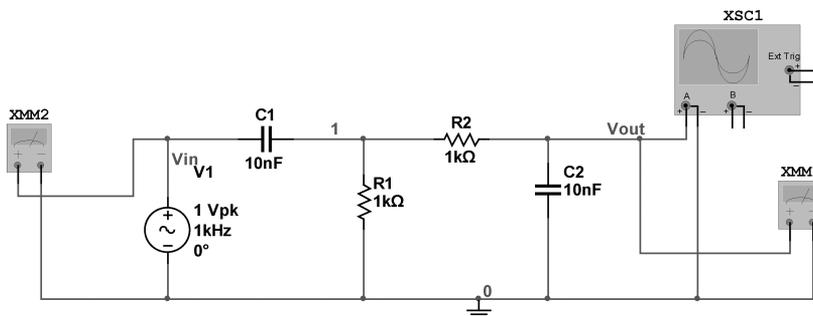


图 3-48 无源带通滤波器电路

由图 3-49 的频率响应可知,其幅度在 16kHz 时最大,幅度约为 0.333,未达到 0.707 (-3dB)。造成这一现象的原因在于图 3-48 带通滤波器电路本质上就相当于一个高通

滤波器和低通滤波器串联,由于负载效应的影响,导致其信号在传输过程中损失,这也是采用无源带通滤波器电路必须考虑的问题。从幅频特性曲线的形状来看,电路特性的确表现出了带通特性。

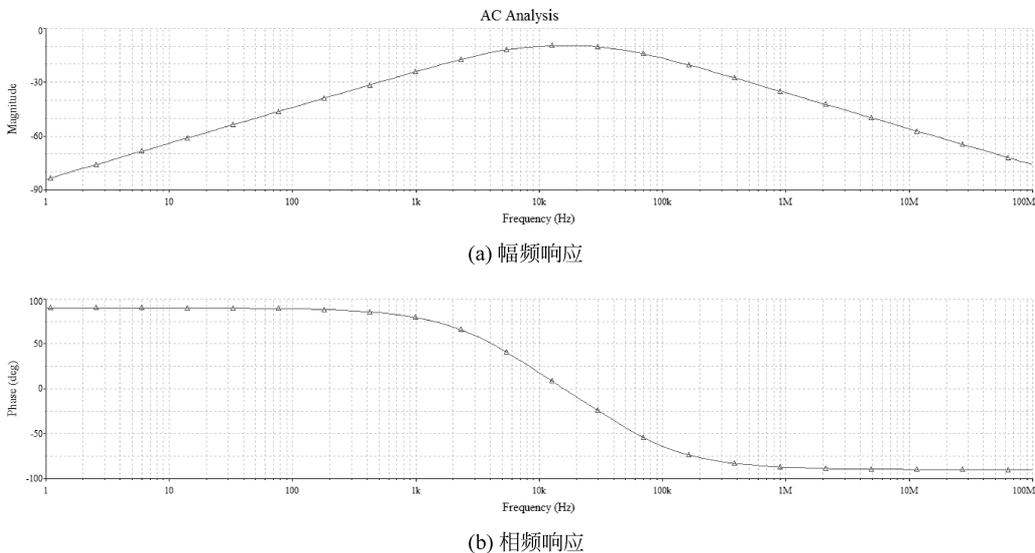


图 3-49 无源带通滤波器的频率响应

2. 有源带通滤波器仿真分析

构建如图 3-50 所示的有源带通滤波器电路。在此电路中,相当于图 3-48 的无源带通滤波器与一个跟随器相连,其目的在于提高无源带通滤波器的带载能力。

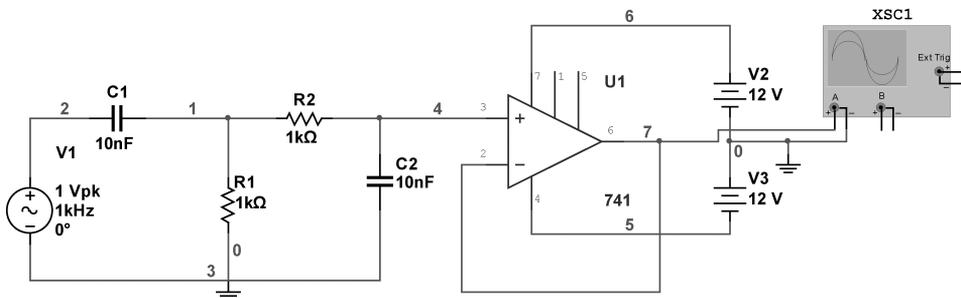


图 3-50 有源带通滤波器电路

电路的频率响应如图 3-51 所示,其幅度在 160kHz 时最大,约为 1(0dB),在 32kHz 和 1MHz 达到 0.707(-3dB),带通滤波器的通带为 32kHz~1MHz。通过此例可知,相比无源带通滤波器,由于跟随器的作用,可以有效避免负载效应的影响,而且由于负反馈的影响,带宽变大。由图 3-51 的相频响应图可知,其相位为 -90° 以下,与无源带通滤波器相频响应相比,延迟加大。

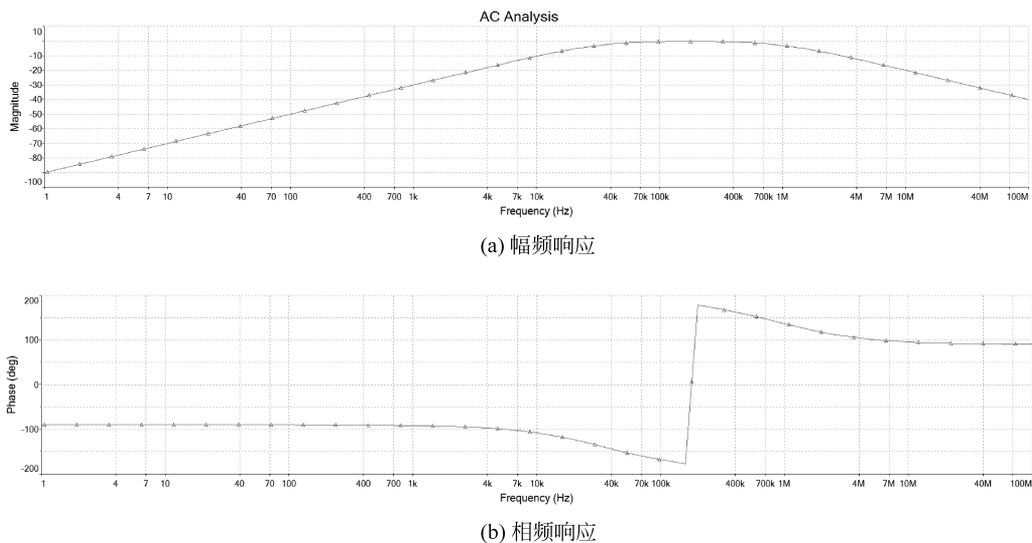


图 3-51 有源带通滤波器的频率响应

思考题

1. 改变本节仿真案例电路中的参数,利用频率响应分析功能,分析其幅频和相频响应。
2. 独立设计一个带阻滤波器仿真电路,并分析其幅频和相频响应。
3. 阅读相关文献,设计大于 3 阶的高阶有源低通和高通滤波器,分析其幅频和相频响应。

3.5 案例 4 计算机测试系统接口电路仿真分析

3.5.1 实践目标

- (1) 通过仿真案例,掌握计算机测试系统接口电路组成及工作原理。
- (2) 掌握计算机测试系统接口电路分析和设计方法。

3.5.2 计算机测试系统接口电路

计算机测试系统的接口电路主要包括多路模拟开关、采样/保持电路、A/D 与 D/A 转换器。虽然现在很多 A/D、D/A 转换器中已经将多路模拟开关和采样保持电路都集成在单个芯片上,但是将其分开学习,更容易掌握各电路的用途和存在的价值,对学生理解测试系统工作原理是十分有益的。

1. 多路模拟开关

实际的测试系统通常要进行多参量测量,即采集来自多个传感器的输出信号,如果每一路信号都采用独立的信号调理、采样/保持、A/D 转换,则系统成本将比单路成倍增加,而且系统体积庞大。同时,由于模拟器件、阻容元件参数、特性不一致,给系统的校准带来很大困难。为此,通常采用多路模拟开关来实现信号测量通道的切换,将多路输入信号分时输入,共用输入回路进行测量。

对于一个多路模拟开关的技术指标要求是:导通电阻小,断开电阻大。此外,要求各输入通道之间有良好的隔离,以免互相串扰。在以前的数控系统中,大多采用干簧继电器作为多路开关,结构简单,闭合电阻小,断开阻抗高,不受环境温度影响,一度应用较多。目前,计算机测试系统中常采用 CMOS 场效应模拟电子开关,其导通电阻一般在 200Ω 以下,关断时漏电流一般可达纳安甚至皮安级,开关时间为几百纳秒。与传统的机械触点式开关相比,模拟电子开关有功耗低、体积小、易于集成、速度快等特点,近年来得到了广泛的应用。但在某些特殊场合,如低速但要求高精度或高隔离度的数据采集系统中,以干簧管、继电器为代表的机电式多路模拟开关仍被采用。

2. 采样/保持电路

由于 A/D 转换器的转换过程需要一定时间,因而采样值在 A/D 转换过程中要能够保持不变,否则,转换精度会受到影响,尤其是当被测信号变化较快时更是如此。有效的措施是在 A/D 转换器前级设置采样/保持电路,能够完成这一工作的电路称为采样/保持器(简称 S/H)。

采样/保持器(Sample/Hold)的原理如图 3-52 所示。图中 A_1 及 A_2 为理想的同相跟随器,其输入阻抗及输出阻抗分别趋于无穷大及零。控制信号在采样时使开关 S 闭合,此时存储电容器 C_H 迅速充电达到输入电压 V_x 的幅值,同时充电电压 V_c 对 V_x 进行跟踪。控制信号在保持阶段时使开关 S 断开,此时为理想状态(无电荷泄漏路径),电容器 C_H 上的电压 V_c 可以维持不变,并通过 A_2 送到 A/D 转换器进行模/数转换,以保证 A/D 转换器进行模/数转换期间其输入电压是稳定不变的。

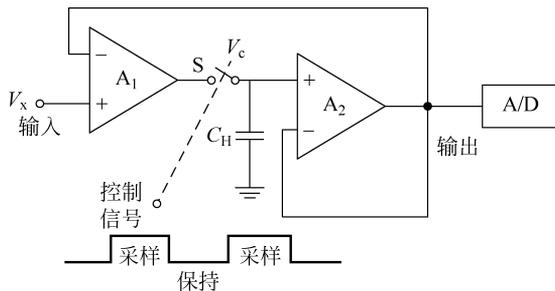


图 3-52 采样/保持电路工作原理

采样/保持器实现了对一连续信号 $V_x(t)$ 以一定时间间隔快速取其瞬时值的功能。

该瞬时值是保持指令下达时刻 V_c 对 V_x 的最终跟踪值,该瞬时值保存在记忆元件——电容器 C_H 上,供 A/D 转换器再进一步进行量化。采样/保持器是以“快采慢测”的方法实现对快变信号进行测量的有效手段。

3. A/D 转换器

在测试系统中,常需要将检测到的连续变化的模拟量,如力矩、加速度、压力、流量、速度、光强等(一般为电压信号),转变成离散的数字量,才能输入计算机中进行处理。实现模拟量到数字量转变的设备通常称为模/数转换器(Analog-Digital Converter),简称 A/D 转换器。下面简要介绍 A/D 转换器的基本原理和分类。

根据 A/D 转换器的原理可将 A/D 转换器分成两大类,一类是直接型 A/D 转换器,将输入的电压信号直接转换成数字代码,不经过中间任何变量;另一类是间接型 A/D 转换器,将输入的电压转换成某种中间变量(时间、频率、脉冲宽度等),再将这个中间量变成数字代码输出。

尽管 A/D 转换器的种类很多,但目前广泛应用的主要有四种类型:逐次逼近式 A/D 转换器、双积分式 A/D 转换器、 Σ - Δ 型 A/D 转换器、V/F 变换式 A/D 转换器。

逐次逼近式 A/D 转换器的基本原理是:将待转换的模拟输入信号与一个推测信号进行比较,根据二者大小决定增大还是减小输入信号,以便向模拟输入信号逼近。推测信号由 D/A 转换器的输出获得,当二者相等时,向 D/A 转换器输入的数字信号就对应模拟输入量的数字量。这种 A/D 转换器一般速度很快,但精度一般不高。常用的有 ADC0801、ADC0802、AD570 等芯片。

双积分式 A/D 转换器的基本原理是:先对输入模拟电压进行固定时间的积分,然后转为对标准电压的反相积分,直至积分输入返回初始值,这两个积分时间的长短正比于二者的大小,进而可以得出对应模拟电压的数字量。这种 A/D 转换器的转换速度较慢,但精度较高。由双积分式发展为四重积分、五重积分等多种方式,在保证转换精度的前提下提高了转换速度。常用的有 ICL7135、ICL7109 等芯片。

Σ - Δ 型 A/D 转换器由积分器、比较器、1 位 D/A 转换器和数字滤波器等组成。原理上近似于积分型,将输入电压转换成时间(脉冲宽度)信号,用数字滤波器处理后得到数字值。电路的数字部分基本上容易单片化,因此容易做到高分辨率,主要用于音频和测量。这种转换器的转换精度极高,达到 16~24 位的转换精度,价格低廉;缺点是转换速度比较慢,比较适合用于对检测精度要求很高但对速度要求不是太高的检验设备。常用的有 AD7705、AD7714 等芯片。

V/F 转换器是把电压信号转换成频率信号,有良好的精度和线性,而且电路简单,对环境适应能力强,价格低廉,适用于非快速的远距离信号的 A/D 转换过程。常用的有 LM311、AD650 等芯片。

A/D 转换器的主要技术参数如下。

(1) 分辨率:使输出数字量变化一个相邻数码所需输入模拟电压的变化量,习惯上以输出二进制位数表示,也称为精度。例如,一个 10V 满刻度的 12 位 A/D 转换器能分

辨输入电压变化最小为 $10 \times 1/2^{12} = 2.4\text{mV}$ 。

(2) 量化误差：由于 A/D 转换的有限分辨率引起的误差，通常是 1 个或半个最小数字量的模拟变化量，表示为 1LSB 、 $1/2\text{LSB}$ 。

(3) 转换时间 T_C ：完成一次 A/D 转换的时间，如 $1\mu\text{s}$ 。

(4) 转换速率：转换时间的倒数。例如当 $T_C = 20\text{ns}$ 时，其转换速率为 50MS/s ，即每秒完成 50×10^6 次 A/D 转换。

4. D/A 转换器

将数字量转换成模拟量的器件或装置称为数/模转换器，简称为 D/A 转换器。它位于计算机数据采集板的输出通道，是计算机测试系统后向通道（输出通道）的主要环节。

D/A 转换器的输入数字量 D （数字代码）、输出模拟电压 V_o 和参考电压 V_R 的关系为

$$V_o = DV_R \quad (3-20)$$

若 D 为二进制数字量，即 $D = a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_i 2^{-i} + \dots + a_n 2^{-n}$ ($a_i = 0$ 或 1)，则

$$V_o = V_R (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_i 2^{-i} + \dots + a_n 2^{-n}) = V_R \sum_{i=1}^n a_i 2^{-i} \quad (3-21)$$

或

$$V_o = \frac{V_R}{2^n} \sum_{i=1}^n a_i 2^{n-i} \quad (3-22)$$

式中， a_1 ——最高有效位 (MSB-Most Significant Bit)； a_n ——最低有效位 (LSB-Least Significant Bit)； n ——D/A 转换器输入数字量的位数； $\frac{V_R}{2^n}$ ——D/A 转换器的量化单位。

D/A 转换器的主要技术参数如下。

(1) 分辨率：当输入数字发生单位数码变化（即 LSB 产生一次变化）时，所输出模拟量的变化量称为分辨率，通常用输入数字量的位数表示。对于 5V 满量程，采用 8 位 D/A 转换器时，分辨率为 $5/256 = 19.5\text{mV}$ 。

(2) 线性度：实际转换特性曲线与理想直线特性之间的最大偏差。常以相对于满量程的百分数表示。如 $\pm 1\%$ 是指实际输出值与理论值之差在满量程的 $\pm 1\%$ 以内。

(3) 响应时间：输入数字量变化后，输出模拟量稳定到相应数值范围内（通常为 $1/2\text{LSB}$ ）所经历的时间。

3.5.3 多路模拟开关电路仿真分析

ADG508 是一种典型的 CMOS 模拟开关，8 个输入通道，1 个输出通道，可以通过芯片本身的译码电路来控制其通道的选择。

构建如图 3-53 所示电路。V3 和 V4 模拟两路输入信号,其中 V3 为 1kHz 的正弦信号,峰值为 1V,V4 为 1kHz 的矩形波信号,TTL 电平。V3 输入 ADG508 的 S1 通道,V4 输入 S8 通道,公共输出端为 D,接 LM358 运算放大器的同相输入端 3。由于 LM358 此处连接成了跟随器,所以 LM358 的输出端 1 信号波形与输入端相同。ADG508 通道选择控制则取决于其译码逻辑单元,在 EN 脚为逻辑高的情况下,通道接通取决于 A0、A1、A2 的逻辑组合。在图 3-52 中,A0、A1、A2 为“000”,接通 S1 与公共输出端 D。图 3-54 表明了此时的 V3 信号通过了模拟开关,V4 信号被阻挡。

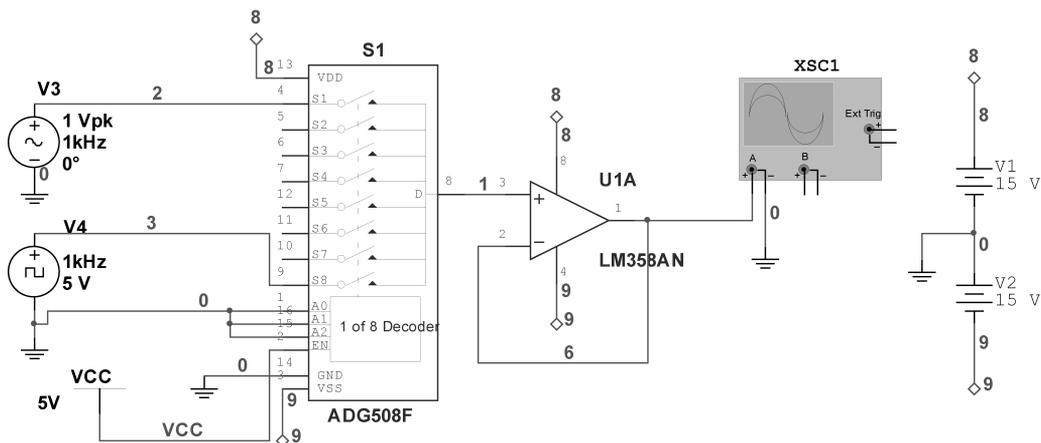


图 3-53 多路模拟开关电路输入通道选择 S1

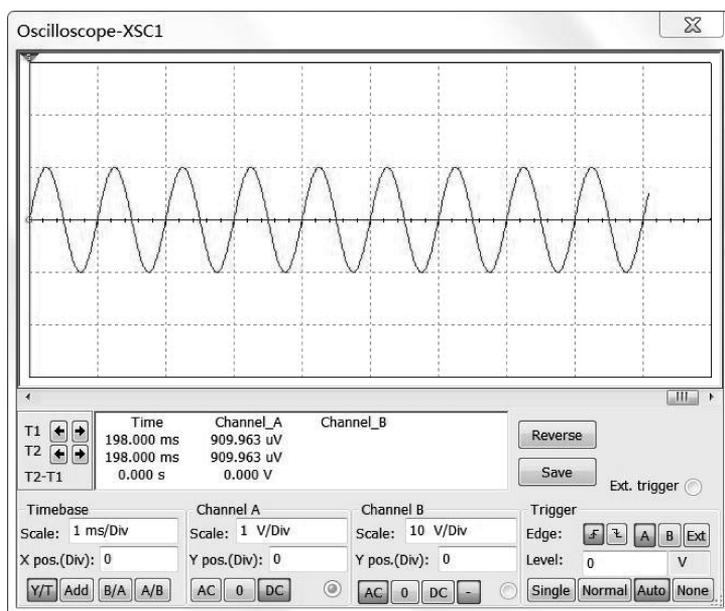


图 3-54 V3 信号通过多路模拟开关

如果将 A0、A1、A2 接为如图 3-55 所示的“111”，则 S8 通道与公共输出通道接通，V4 矩形波信号输出，V3 信号被阻挡，波形如图 3-56 所示。

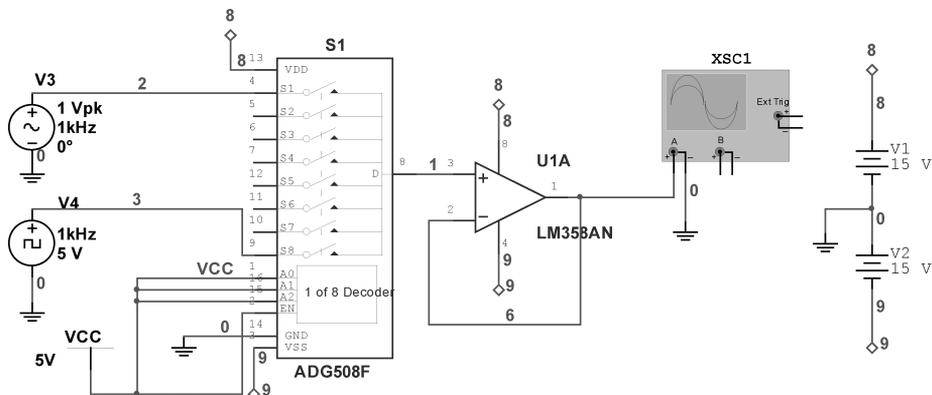


图 3-55 多路模拟开关电路输入通道选择 S8

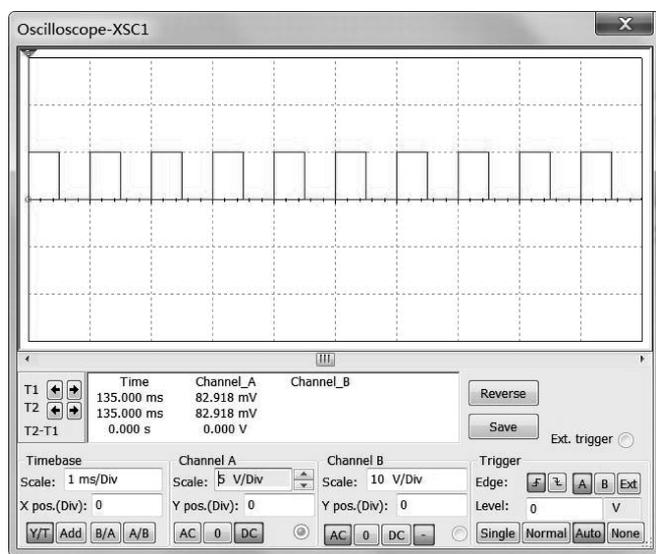


图 3-56 V4 信号通过多路模拟开关

3.5.4 采样/保持电路仿真分析

构建如图 3-57 所示的采样/保持电路。被采样信号由 V1 输出，100Hz 的正弦波，峰值为 1V。采样开关用受控开关 S1 代替，其通断受到 V2 输出的信号控制。本例中，控制信号是 2kHz 的矩形波，需要注意的是，为了使输出信号的台阶效应更明显，需要将矩形波的占空比设置在 5% 以下。图 3-58 是采样/保持电路的输入和输出信号。经过采样/保持电路后的信号，可以有效地克服 A/D 转换器的“孔径效应”，正确地完成 A/D 转换。

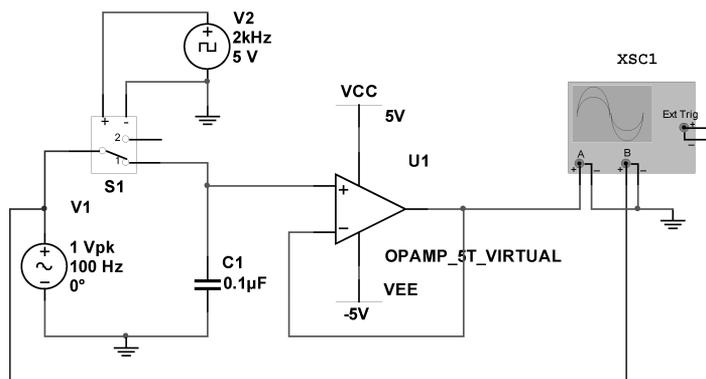


图 3-57 采样/保持电路

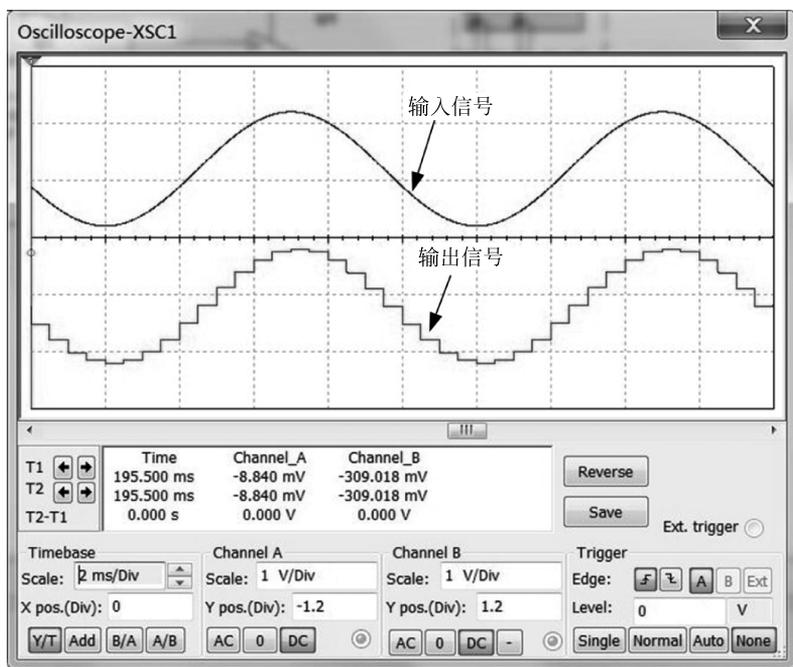


图 3-58 采样/保持电路的输入、输出信号

3.5.5 A/D 转换电路仿真分析

构建如图 3-59 所示的 8 位 A/D 转换电路。本例中 U1 是 ADC 器件,可将输入的模拟信号转换成 8 位数字信号输出,其引脚的说明如下。

Vin: 模拟电压输入端子。

Vref+: 参考电压“+”端子,接直流参考源的正端。

Vref-: 参考电压“-”端子,一般与地连接。

SOC: 启动转换信号端子, 只有端子电平从低电平变成高电平时, 转换才开始, 转换时间为 $1\mu\text{s}$, 期间 EOC 为高电平。

EOC: 转换结束标志位端子, 高电平表示转换结束。

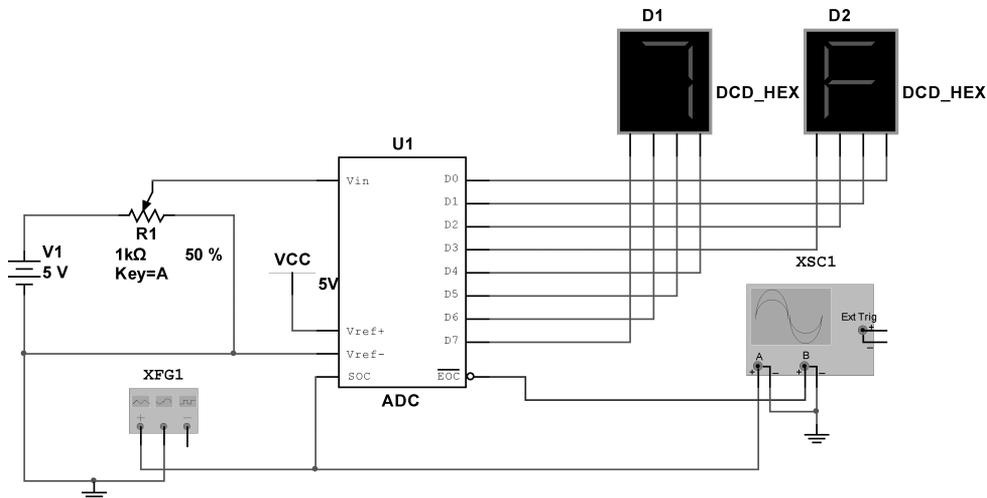


图 3-59 8 位 A/D 转换电路

模拟量输入电压通过改变电位器 R1 来实现, 在仿真电路中可观察到 2 个虚拟数码管 D1、D2 的数值变化。在图中, 模拟量输入为 2.5V, 数码管显示“7F”, 根据 8 位 A/D 转换规则, 对应模拟电压 2.49V, 正确。

XFG1 中设置输出 10kHz 的矩形波, TTL 电平, 这也就代表 A/D 转换器的采样频率为 10kHz, 换言之, 相当于 A/D 转换器的启动信号为 10kHz。A/D 转换期间 EOC 为高电平, 持续时间为 $1\mu\text{s}$, 如图 3-60 所示。

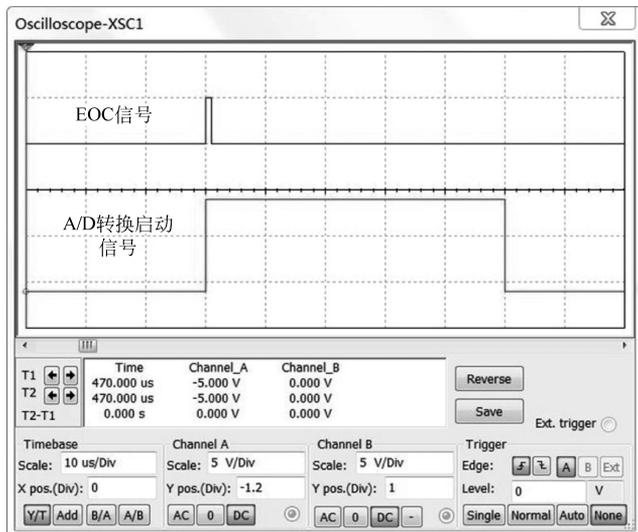


图 3-60 A/D 转换启动信号和 EOC 信号

3.5.6 D/A 转换电路仿真分析

为了更清晰地展示 A/D、D/A 的过程,对图 3-59 所示电路进行改进,在输入端,将直流输入+5V 改为正弦输入信号 V1,其峰值为 2V,20Hz,偏移量为 2V。注意,这里 V1 设置时一定要设置偏移量,读者可以考虑一下为什么。在 U1 输出端 D0~D7 上,连接一个 DAC 芯片 U2,完成 8 位 D/A 转换。本电路中所用 DAC 芯片是电流型 DAC,即 IDAC。IDAC 选用默认设置即可,如果不满意,可以打开其设置对话框重新设置。XFG1 输出设置为 1kHz 矩形波,符合 TTL 电平。改进后的电路如图 3-61 所示。

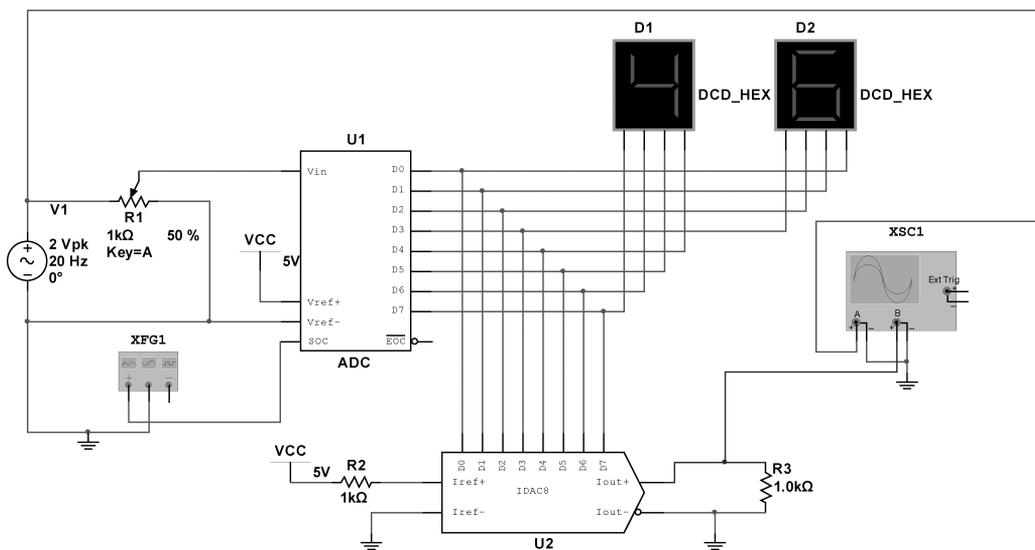


图 3-61 A/D、D/A 转换电路

按下仿真开关,打开示波器 XSC1,其上显示 A/D 转换电路输入的模拟信号以及 IDAC 输出的信号波形,如图 3-62 所示。输入信号为正弦波,其 VPP 为 4V,输出信号为“台阶式”正弦波,其 VPP 为 2V,这是因为输入信号经过电位计 R1 后,其幅度减少了一半所致。

为了将 D/A 输出的“台阶式”信号变为光滑的模拟信号,需要在输出端接上滤波电容 C1,如图 3-63 所示。

从图 3-64 输出信号波形可见,此电路很好地实现了将模拟信号通过 A/D 转换电路变为数字信号,再通过 D/A 转换电路变换回模拟信号的一个完整过程。

思考题

1. 利用本节中所提供的例子程序,完成仿真实验。

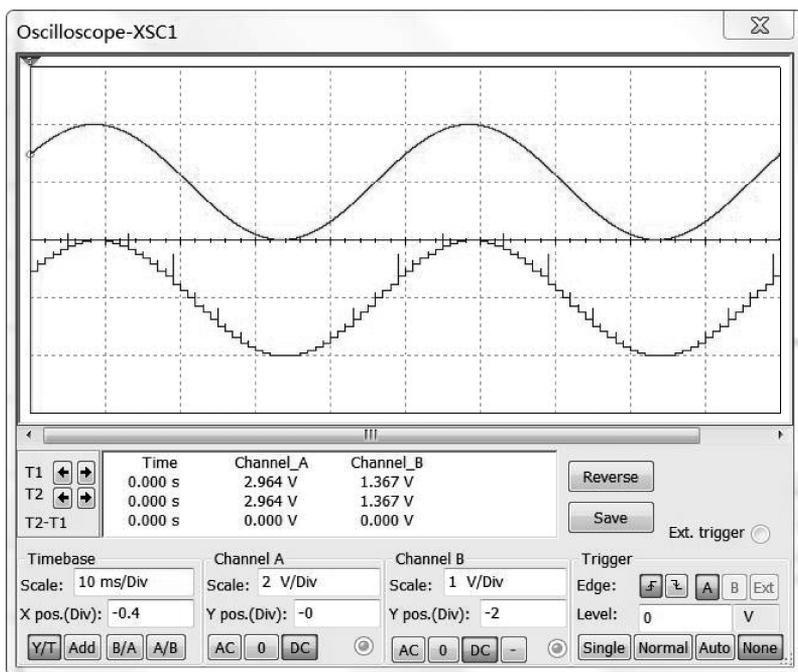


图 3-62 A/D输入信号和 D/A 输出信号

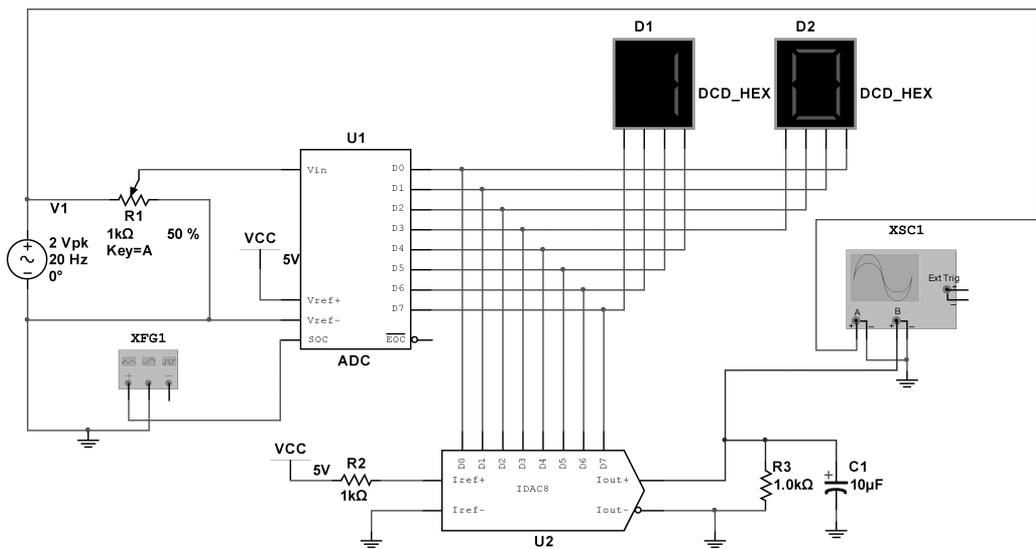


图 3-63 输出端接上滤波电容 C1

2. 查阅相关文献,独立设计模拟多路开关电路和采样/保持电路,并利用软件验证其工作过程。
3. 改变本节中所用到的模/数、数/模和仿真电路的结构,验证其工作过程。

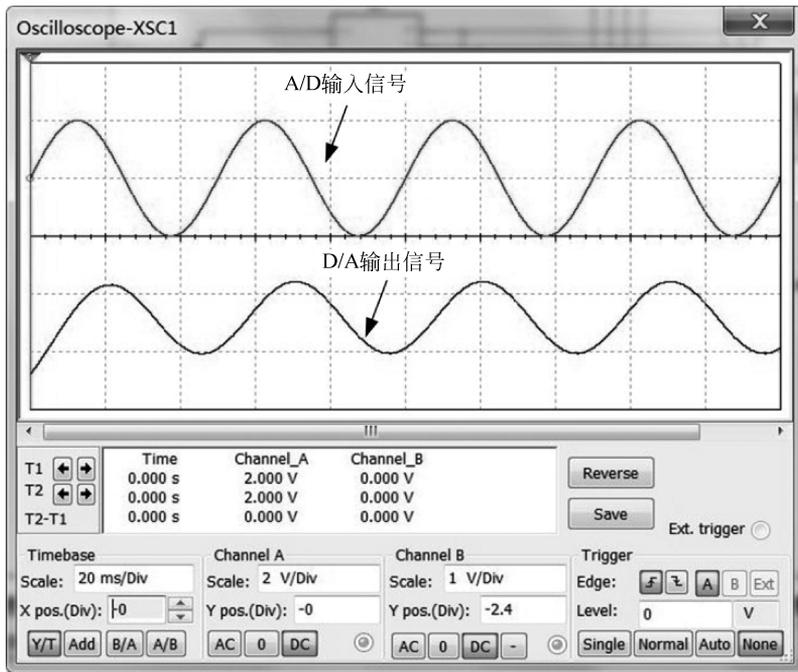


图 3-64 加滤波电容后的输入信号与输出信号