# 第3章 基于 Multisim 8 软件的电路仿真实验

# 3.1 电路仿真实验

### 【实验目的】

(1) 了解和熟悉 Multisim 8 软件的基本功能和使用方法。

(2) 掌握在 Multisim 8 软件平台上进行基本电路仿真实验的方法。

## 【相关知识要点】

Multisim 软件拥有丰富的仿真手段和强大的分析功能,它不仅可以对直流电路、交流稳态电路、暂态电路进行仿真,也可以对模拟电路和数字电路进行仿真,甚至还可以对电动机及其控制电路进行仿真。Multisim 软件提供了多种交互式元件,比如电位计、可变电感、可变电容和多向开关等,使用者可以通过键盘简单地改变交互式元件的参数,并运用虚拟仪器得到相应的仿真结果。对同一个电路,不仅可以用虚拟仪器显示仿真结果,还可以用电路分析功能对运行结果进行分析和显示。

1. 用 Multisim 8 软件验证叠加原理

首先在 Multisim 8 软件的电路窗口中构建如图 2.1.2 所示的叠加原理实验电路。在元件浏览器中选择 Sources(Group)/POWER\_SOURCES(Family)/DC\_POWER(Component)作为理想直流电压源;选择 Basic(Group)/BASIC\_VIRTUAL(Family)/RESISTOR\_VIRTUAL(Component)作为电阻元件,其参数可以通过在电路编辑窗口中对某个元件进行双击后修改;选择 Basic(Group)/SWITCH(Family)/TD\_SW1(Component)作为单刀双掷开关,本电路中需要用到两个开关,其中一个开关用键盘上的[空格]键控制开关的位置,另一个开关用键盘上的 A 键控制;在 Multisim 8 软件中进行电路仿真分析时,要求必须有接"地"点,在元件浏览器中选择 Sources(Group)/POWER\_SOURCES

(Family) /GROUND (Component),将电压源的"-"端接地,以便于 分析各节点电位。

1) 用虚拟数字万用表测试电压、电流

在仪器仪表工具栏中,选择两个数字万用表,一个测试负载 电阻 *R*<sub>L</sub> 两端的电压,一个测试流过 *R*<sub>L</sub> 的电流。电路连接完成 后,打开两个数字万用表(如图 3.1.1 所示),分别选择直流电压



挡和电流挡,然后单击仿真工具栏上的仿真按钮,则负载电阻 图3.1.1 虚拟数字万用表的面板

*R*<sub>L</sub>的电压、电流将会在数字万用表上显示出来。通过键盘上的[空格]键和 A 键调节,分别记录 两个电源单独作用和同时作用时负载电阻的电压和电流,以验证是否满足叠加原理。

2) 用显示元件组中的电表测试电压、电流

这里也可以用显示元件组(Indicators Group)中的电压表和电流表代替虚拟数字万用表,进行 上述电压、电流的测试。选择 VOLTMETER(Family)/VOLTMETER\_V(Component)作为电压表,选 择 AMMETER(Family)/AMMETER\_V(Component)作为电流表,它们的符号图如图 3.1.2 所示。



图 3.1.2 电压表和电流表的符号图

3) 用"直流工作点分析"方法计算电压、电流

直流工作点分析(DC Operating Point Analysis)用于计算电路的静态工作点,对于纯直流电路 来说,它可以输出各个节点的电位、独立电压源中的电流(其参考方向是在电源内部从电源的正 端指向负端)。如想要测试其他支路的电流,还需在其参数设置对话框中的更多选项中增加测 试元件参数。

假设本电路已经编辑完毕,删除其中的测试电表,然后单击工具栏中的分析按钮,选择"DC Operating Point Analysis"后,立即弹出如图 3.1.3 所示的对话框。在此窗口的 Output 标签中的左 边的 Variables in circuit(电路中的可见参数)下的参数列表中有可以输出的参数: \$1、\$2、\$3、 \$4、\$5和 vv1#branch、vv2#branch,说明可以输出节点 1、2、3、4、5的电压以及电压源  $V_1$ 和  $V_2$ 中 的电流。在本电路中我们需要测试的是节点 5 的电压,因此从 Variables in circuit 下的参数列表 中选中 \$5,再单击 Add 按钮,此时对话框如图 3.1.3 所示。

| DC Operating Point Analys                            | is                                    |                        | X  |
|--|---------------------------------------|------------------------|----|
| Output Analysis Options S                            | nuu ar. A                             |                        |    |
| Variables in circuit                                 | _                                     | Selected variables for |    |
| All variables 🔽                                      | ]                                     | All variables          | •  |
| \$1<br>\$2<br>\$3<br>\$4<br>vv1#branch<br>vv2#branch | >> <u>A</u> dd ><br><< <u>R</u> emove | \$5                    |    |
| ilter Unselected Variables                           |                                       |                        |    |
| More >> Simulat                                      | e OK                                  | Cancel Hel             | .p |

图 3.1.3 直流工作点分析的参数设置对话框

为了得到负载电阻 R<sub>L</sub>(在 Multisim 8 软件模型中负载电阻定义为 rr4)中的电流,在如图 3.1.3 所示的对话框中单击 More >> 按钮,再单击 Add device/model parameter 按钮,则弹出如图 3.1.4 所示的增加元件/模型参数对话框。该对话框的左边是 Parameter Type(参数类型),这里 选择 Device Parameter(元件参数),在该对话框的右边分别选择 Resistor、rr4 和 i,即说明是为了 测试负载电阻 rr4 中的电流,此时对话框如图 3.1.4 所示。

| Add device/model                   | parameter      |   |              | X            |
|------------------------------------|----------------|---|--------------|--------------|
| Parameter Type<br>Device Parameter | ▼<br>Descripti | Device Type<br>Name<br>Parameter<br>Current | Resistor rr4 | OK<br>Cancel |

图 3.1.4 增加元件/模型参数对话框

当元件参数设置完毕后,单击"OK"按钮,此时在如图 3.1.3 所示对话框中的 Variables in circuit下的参数列表中将增加一项@rr4[i],如图 3.1.5 所示。如还需要测试其他支路的电压、电流,只需重复上述的操作步骤即可。

| Operating Point An  | lysis       |                               |                               | 2                                       |
|---|-------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| Output Analysis Option  | s   Summary | ]                             |                               |   |
| Variables in circuit  |             |                               | Selected w                    | variables for                           |
| All variables   | <b>•</b>    |                               | All varia                     | bles 💌                                  |
| \$1<br>\$2<br>\$3<br>\$4<br>@rr4[i]<br>vv1#branch<br>vv2#branch | »[<br>«[    | <u>A</u> dd<br><u>R</u> emove | \$5<br>>>><br><<              |   |
| ilter Unselected Varia  | ables       |                               |                               |   |
| Add device/model pa   | rameter     |                               | Filter sel                    | ected variables                         |
| Delete selected van   | iables      |                               | Show al<br>paramet<br>simulat | l device<br>ers at end of<br>ion in the |
| Less < 🔶 Sin  | ulate       | OK                            | Cancel                        | Help                                    |

图 3.1.5 在直流工作点分析的对话框中增加了一项待测电流

最后从 Variables in circuit 下的参数列表中选中@ rr4[i],再单击 Add 按钮,此时参数设置完毕。单击 Simulate 按钮可以得到分析结果,如图 3.1.6 所示,它说明在两个电源同时作用下负载电阻 *R*<sub>L</sub>(rr4)上的电压为 4.5 V,电流是 15 mA。分别操作键盘上的[空格]键和 A 键,重复上述

| 🌮 G1  | rapher Vie <del>v</del>                 | L              |     |
|-------|---|----------------|-----|
| File  | <u>E</u> dit <u>V</u> iew <u>T</u> ools |                |     |
| ۵۵    | ≇ 🖬 🖨 🖪 📕 🕷 🖻 😫 🗏 🗏                     | # II M @, Q, @ | à 🖬 |
| DC o  | operating point                         |                |     |
|       | Circuit1                                |                |     |
|       | DC Operating                            | Point          |     |
|       | DC Operating Point                      |                |     |
| 1     | \$5                                     | 4.50000        |     |
| 2     | @rr4[i]                                 | 15.00000 m     |     |
|       |   | ·              |     |
| Selec | ted Diagram: IC Operating Point         |                | 1   |

图 3.1.6 直流工作点分析结果

的分析过程,可得在两个电源单独作用下负载电阻上的电压和电流。

2. 用 Multisim 8 软件测试戴维宁等效电路

1) 用虚拟数字万用表测试

对图 2.1.2 所示的叠加原理实验电路图,我们希望获得断开负载电阻 R<sub>1</sub> 后的戴维宁等效电路,因此,在编辑电路时去掉电阻 m4。首先用虚拟数字万用表的电压挡测试其开路电压,然后将理想电压源短路或将其参数设置为零,用虚拟数字万用表的电阻挡测试其等效电阻,即可获得其戴维宁等效电路。

2) 用转移函数分析计算

转移函数分析(Transfer Function Analysis)可以得到某端口的输出电压对某个电源的传递 函数(即端口电压与电源之比)、输出阻抗和输入阻抗。因此可用以求出二端网络的戴维宁等 效电路。

在 Multisim 8 软件模型中删除其中的测试电表,选择 Transfer Function Analysis 后立即弹出 如图 3.1.7 所示的对话框。在此窗口的 Analysis Parameters 标签中定义输入电源是 vv1(即 V<sub>1</sub>), 输出端是 \$5,参考节点是 \$0。分析结果如图 3.1.8 所示。

从图 3.1.8 可以看出,有源二端网络的输出电阻是 50 Ω,即戴维宁等效电路的内阻是 50 Ω; 以  $V_1$  为信号源时的输入电阻是 200 Ω,转移函数是 500 m(500 × 10<sup>-3</sup>),即此时端口电压与电源  $V_1$  之比为 0.5。当只有一个电源时,转移函数乘电源就是有源二端网络的开路电压。但是此电 路有两个电源,因此在图 3.1.7 所示的对话框中,将输入电源修改为 vv2(即  $V_2$ ),再作一次转移 函数分析,可得输出电阻仍为 50 Ω,转移函数为 250 m(250 × 10<sup>-3</sup>),即此时端口电压与电源  $V_2$ 之比为 0.25,那么可得该有源二端网络的开路电压为

 $U_{\rm oc} = 0.5V_1 + 0.25V_2 = (0.5 \times 6 + 0.25 \times 9)$  V

3. 用 Multisim 8 软件进行交流稳态电路分析

1) 用虚拟示波器测试谐振点

已知在 *RLC* 串联电路中,  $R = 100 \Omega$ , C = 100 nF, L 为一可调电感, 其最大值为 0.2 mH, 正弦

| Transfer Function Analysis   |            |         | ×                      |
|--|------------|---------|------------------------|
| Analysis Parameters Analysis Option  | ns Summary |         |                        |
| Input source   | vv1        | Chang   | ge Filter              |
| Output nodes/source  |            |         |                        |
| <ul> <li>Voltage</li> <li>Output node</li> <li>Output reference</li> </ul> | \$5<br>\$0 | Chang   | ge Filter<br>ge Filter |
| C Current  |            |         |                        |
| Output source  | vv1        | - Chang | ge Filter              |
|  |            |         |                        |
| More >> Simulate   | OK         | Cancel  | Help                   |

图 3.1.7 转移函数分析的参数设置对话框

| 🤹 G. | rapher Vie <del>v</del>                   |         |          | _ 🗆 🗙 |
|------|---|---------|----------|-------|
| File | e <u>E</u> dit <u>V</u> iew <u>T</u> ools |         |          |       |
| ٦ı   | ≤⊟⊜⊾∣ՀԳՇ⊆∣≝                               | # 🗏 Ľ   | 14 Q, Q, | ۹ 🖬   |
| Tra  | nsfer Function                            |         |          |       |
|      | Circuit1                                  |         |          |       |
|      | Transfer Func                             | tion    |          |       |
|      | Transfer Function Analysis                |         |          |       |
| 1    | Transfer function                         | 500.000 | 000 m    |       |
| 2    | vv1#Input impedance                       | 200.00  | 019      |       |
| 3    | Output impedance at V(\$5,\$0)            | 50.000  | 00       |       |
|      |   | -       |          |       |
|      |   |         |          |       |
| Sele | cted Diagram: Transfer Function           |         |          |       |

图 3.1.8 转移函数分析结果

电压源的有效值为5V,频率为50kHz。在Multisim 8软件的电路窗口中编辑实验电路时,选择 Sources(Group)/POWER\_SOURCES(Family)/AC\_POWER(Component)作为正弦电压源,其有效 值和频率可通过双击其符号图进行修改;选择Basic(Group)/BASIC\_VIRTUAL(Family)/VARIA-BLE\_INDUCTOR\_VIRTUAL(Component)作为可调电感,按键盘A键可增大其电感量,按键盘 [Shift + A]组合键则减小其电感量; R和C都选用虚拟元件。

单击仪器仪表工具栏中虚拟双通道示波器按钮,用其中一个通道观察正弦电压源的波形,用 另一个通道观察电阻电压的波形。按下仿真按钮,不断调节电感参数,当电源电压和电阻电压波 形大小相等,相位差为零时(如图 3.1.9 所示),电路处于谐振状态。请读者思考:当电路谐振 时,增大或减小电感量,电路呈容性或感性?

在该电路中也可以用虚拟数字万用表的电压挡测试电阻电压的有效值。在调节电感参数的 过程中,当电阻电压的有效值与电源电压的有效值相等时,电路处于谐振状态。请读者思考:当 电路处于谐振状态时,应如何测量并计算出电路的品质因数?



图 3.1.9 用虚拟双通道示波器测试的电压波形

2) 用暂态分析观测电压、电流波形

暂态分析(Transient Analysis)是以时间为变量的分析,从某时刻开始,每经过一定的时间间隔(步长),分析、计算该时刻的输出值,直到结束时刻。因此,用暂态分析可以输出电压、电流随时间变化的波形。

在 *RLC* 串联电路中,令*L*=0.14 mH,为了观察电感和电容的电压波形,让它们之间的连接 点接地,然后选择 Transient Analysis,立即弹出如图 3.1.10 所示的对话框。在初始条件(Initial Conditions)下拉菜单中选择开始分析时电路的初始值,这里选择自动确定初始值。起始时间 (Start time)设置为0 s,结束时间(End time)设置为0.1 ms,最大时间步长(Maximum time step settings)设置为0.1 μs。在 Output 标签对应的窗口中定义输出节点 2 和节点 3 的电压。然后单击

| nsient Analys:   | s                 |                |          |                  |
|------------------|-------------------|----------------|----------|------------------|
| nalysis Paramete | rs Output Analy   | sis Options∫Su | mmary    |                  |
| - Initial Condit | ions —            |                |          | Reset to default |
| Automatically    | determine initial | l conditions   | <b>_</b> | neset to geradic |
| – Parameters –   |                   |                |          |                  |
| Start time       | 0                 | Sec            |          |                  |
| End time         | 0.0001            | Sec            |          |                  |
| 🔽 Maximum tim    | e step settings ( | :              |          |                  |
| 🔿 Minimum        | number of time p  | oin            |          |                  |
| 🖲 Maximum        | time step (TMAX)  | 1e-007         | Sec      |                  |
| C Generat        | e time steps auto | mat            |          |                  |
| More >>          | Simulate          | OK             | Cancel   | Help             |

图 3.1.10 暂态分析的参数设置对话框

Simulate 按钮,分析结果为如图 3.1.11 所示的波形。



图 3.1.11 暂态分析的输出波形

请读者思考:改变正弦电源的频率或电感、电容的参数,重复上述的暂态分析过程,能否从图 3.1.11 的波形观测到谐振现象?为了在暂态分析中便于观察电感和电容电压的波形,让它们之间的 连接点接地,那么当电路发生谐振时,图 3.1.11 所示的电感和电容电压波形的相位关系应如何?

3) 用交流分析电路的频率特性

交流分析(AC Analysis)是对信号源的频率进行扫描,输出节点电压的幅值和相位相对于频率的变化曲线,即输出某节点电压的幅频特性曲线与相频特性曲线。所以,可以利用交流分析画出网络转移函数的幅频特性曲线与相频特性曲线。

对上述的 *RLC* 串联电路,若输出电阻电压的频率特性,可选择 AC 分析,立即弹出如图 3.1.12 所示的对话框。这里设置开始频率是 100 Hz,结束频率是 10 MHz,频率扫描形式是十倍频程,每十 倍频程计算 10 个点,纵坐标取线性。然后在 Output 标签对应的窗口中设置要输出的节点,这里输出节点是 \$3。然后单击 Simulate 按钮,立即弹出如图 3.1.13 所示的频率特性曲线。

| AC Analysis<br>Frequency Parameters Outpu<br>Start frequency (FSTART)<br>Stop frequency (FSTOP)<br>Sweep type<br>Number of points per<br>Vertical scale | t Analysis Options Summary | /]<br><u>Reset to d</u> efault |
|---|----------------------------|--------------------------------|
| More >> Simulat   | .e 0K                      | Cancel   Help                  |

图 3.1.12 交流分析的参数设置对话框

在图 3.1.13 所示的频率特性曲线中,上面部分是幅频特性曲线,下面部分是相频特性曲线。 当电路发生谐振时,电阻电压获得最大值,它与电源电压的相位差为零,整个电路呈阻性。对特 性曲线用测试光标可以测量其谐振频率。并且从相频特性曲线可以看出,当电源频率小于谐振 频率时,电阻电压超前电容电压;当电源频率大于谐振频率时,电阻电压滞后电容电压。请读者 思考:电路在什么情况下呈现容性?



图 3.1.13 交流分析的输出频率特性曲线

4. 用 Multisim 8 软件对三相电路进行仿真

一个 Y 联结三相电源,其中  $U_1$  = 220 V, f = 50 Hz, 对称 Y 联结三相负载为纯电阻,其大小为 50  $\Omega_{\circ}$  在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑实验电路时,选择 Sources(Group)/POWER\_SOURC-ES(Family)/THREE\_PHASE\_WYE(Component)作为三相电源,其有效值和频率可通过双击其符 号图进行修改;选择 Basic(Group)/Z\_LOAD(Family)/Z\_LOAD2\_WYE(Component)作为三相对称负载,通过双击其符号图可以修改 *RLC*参数;选择 Basic(Group)/SWITCH(Family)/DIPSW1 (Component)作为中性线开关,该开关由键盘上 A 键控制其断开和闭合。电路编辑完毕后,作如 下仿真。

(1) 用 3 个虚拟数字万用表的交流电压挡分别测量 3 个负载的相电压,观测在中性线接通和断开的情况下,负载的相电压是否发生变化。

(2) 将 A 相负载并联一个 50 Ω 的电阻, B 相负载并联一 个 100 Ω 的电阻, 再观测在中性线接通和断开的情况下, 负载 相电压的变化情况。

(3)保持三相负载不对称,断开中性线,用虚拟功率表 (其前面板如图 3.1.14 所示)测量每相负载的功率,计算出三 相总功率;然后用两瓦计法测量并计算三相总功率,看二者测



图 3.1.14 虚拟功率表的前面板

量结果是否相等。

(4)仍然是不对称负载,接上中性线,分别测量每相负载的功率,计算出三相总功率;再用两瓦计法测量并计算总功率,看二者测量结果是否相等,以此说明两瓦计法测量三相总功率的适用条件。

5. 用 Multisim 8 软件分析电路的暂态 过程

1) 观测一阶电路的暂态过程

在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑一个 RC 电路,通过一个开关接入直流电源,双击电 容符号立即弹出如图 3.1.15 所示的对话框, 在该对话框中除了可以修改电容值外,还可以 设置其电压初始值。同样,对于电感元件也可 以设置其电流初始值。

参数设置完毕后可以通过示波器观测电 容的充放电过程,或者进行暂态分析(Transient

| BASIC_VIBTUAL            |              |        | ×        |
|--------------------------|--------------|--------|----------|
| Label Display Value Faul | t   Pins   V | ariant |          |
| Capacitance:             | 1            | uF     | •        |
| Tolerance:               | 0            | %      |          |
| Initial Conditions:      | 0            | ٧      | <u>.</u> |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
|                          |              |        |          |
| Replace 确定 取             | 消 Infe       |        | 帮助       |

图 3.1.15 电容初始值的设置

Analysis)。选择 Transient Analysis 后,将会弹出如图 3.1.10 所示的对话框。在初始条件(Initial Conditions)的下拉列表中,应选择 User-Defined,即采用用户自定义的初始值。起始时间(Start time)通常设置为零,终止时间(End time)要根据具体电路的时间常数来确定,终止时间的具体数值以能够完整观测到暂态过程为宜。最大时间步长(Maximum time step settings)的大小将影响计算精度,其默认选项为自动确定计算步长(Generate time steps automatically)。

2) 一阶微分与积分电路输出波形的观测

将 RC 电路的直流电源用一个方波信号源替代,选择 Sources(Group)/SIGNAL\_VOLTAGE\_ SOURCES(Family)/CLOCK\_VOLTAGE (Component)作为方波信号,对该电路进行暂态分析或用 示波器观测电阻、电容上的电压波形,选择恰当的元件参数,可以观测到微分和积分输出电压 波形。

3) 用参数扫描分析来分析元件参数对暂态过程的影响

参数扫描分析(Parameter Sweep Analysis)可以对电路的参数进行扫描,并对每个值进行分析。因而,在参数扫描分析时要定义扫描的元件,扫描步长,起始值与结束值,还要定义在每个取 值点要进行分析的种类(如可以在每个取值点进行直流工作点分析、暂态分析等)。

在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑一个 RC 电路,其中直流电压源的电压为 5 V, R = 1 k $\Omega$ , 分析当电容 C 从 1  $\mu$ F 变化到 5  $\mu$ F 时,电容电压暂态响应变化的情况。选择 Parameter Sweep 分析, 立即弹出参数设置对话框,再单击下方的 More 按钮即显示如图 3.1.16 所示的对话框。

在 Sweep Parameter 的下拉菜单中选择 Device Parameter,在元件(Device)右边的下拉菜单中选择扫描(Capacitor),在 Name 下拉菜单中选择 cc1。开始电容量设置为 1  $\mu$ F,结束值设置为 5  $\mu$ F,扫描点数是 5 个点,步长是 1  $\mu$ F。在 Sweep Variable Type 下拉菜单中选择 Linear,即线性扫描。

| Sweep Parameters      |   |               |         |          |
|-----------------------|---|---------------|---------|----------|
| Sweep Parameter       | Device  | Capacitor     |         | <b>•</b> |
| Device Parameter      | - Name  | cc1           |         | •        |
|                       | Parameter   | capacitance   |         | -        |
|                       | Present   | 1e-006 F      |         |          |
|                       | escription  | Device capaci | tance   |          |
| Linear                | <ul> <li>Stop</li> <li># of</li> <li>Increment</li> </ul> | 5<br>5        | μF<br>F | T        |
| More Options          |   |               |         |          |
| Analysis to Trans     | ient Analysis   | •             | Edit An | alysis   |
| 🔽 Group all traces on | . on  |               |         |          |

图 3.1.16 参数扫描分析的参数设置对话框

另外还需定义要进行的分析类型和输出变量。在 More Options 框中的 Analysis to 的下拉菜 单中选择 Transient Analysis(即进行暂态分析)。然后在 Output 标签对应的窗口中定义输出参数 \$2(即电容电压)。参数扫描分析的一组暂态响应曲线如图 3.1.17 所示。单击每条响应曲线, 在该窗口的最下端即可显示出所对应的电容量。从响应曲线可以看出,当电容量越大,电容充电 时间越长。



图 3.1.17 对电容参数扫描分析的暂态响应曲线

【实验内容与步骤】

1. 直流电桥实验

(1) 在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑一个直流电桥电路,其中直流电压电源为5 V,两 个固定电阻为10 kΩ和20 kΩ,电位器取100 kΩ,待测电阻取50 kΩ,虚拟数字万用表的直流电 流挡的内阻设为50 Ω。电路编辑完毕后对电路进行仿真,调节电位器观测电流的变化趋势,记 录下当电桥平衡时电位器的数值,验证是否满足电桥平衡的条件。

(2) 将虚拟数字万用表用一个 50 Ω 的电阻替代,对电位器进行参数扫描分析,扫描的范围 是 0~100 kΩ,扫描步长为 1 kΩ,以 50 Ω 的电阻上的电流作为输出进行直流分析,记录下使电桥 平衡时的电流大小。改变待测电阻的阻值,重新进行参数扫描分析,如果找不到使电桥平衡的 点,则缩小电位器的扫描范围,并减小扫描步长,再进行分析。

2. 功率因数的提高

已知一感性负载,其中 *R* = 230 Ω,*L* = 1.9 H,所加正弦电压的有效值为 220 V,频率为50 Hz。 首先在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑该电路,用虚拟数字功率表测量该负载的有功功率和 功率因数,然后将该负载两端并联一个可变电容,调节电容的大小,再测试电路的总功率和功率 因数,观察总功率是否发生变化,并记录下使电路总的功率因数为1 时所并联电容的大小。

注意:每次改变电容的大小时,请重新进行仿真,并且要待虚拟数字功率表的读数稳定后再 作记录。可变电容最初选取10 µF,首先确定一个大致范围使总的功率因数为1,然后再减小可 变电容的最大值,并减小电容调节的步长进行细调,以确定精确的数值。

3. 微分与积分电路实验

在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑一个 RC 串联电路,其中 C=20 μF,方波信号源的幅值 为 10 V,周期为 1 ms,占空比为 50%,对电阻进行参数扫描分析,分别观察电阻电压和电容电压 的暂态响应,以确定获得尖脉冲和锯齿波输出所需电阻的范围。

#### 【实验报告要求】

(1) 绘制直流电桥实验的电路图,试说明当虚拟数字万用表中的显示电流为正或为负时, 应如何改变电位器的值。

(2) 在提高功率因数的实验中,在未并联电容到并联电容后使功率因数为1之间记录10 组数据,试说明所并联电容的大小与功率因数是否满足线性变化的关系。

(3) 在微积分电路中,分别记录并绘制 3 组尖脉冲和锯齿波输出电压的波形,并说明增大 电阻或减小电阻对输出波形的形状有什么影响。

# 3.2 模拟电路仿真实验

【实验目的】

(1) 掌握在 Multisim 8 软件平台上对由二极管、晶体管等半导体元件和运算放大器构成的 电路进行分析和仿真的方法,主要包括半导体元件特性曲线的测试,单级放大、运算放大器的应 用,直流稳压电源、波形产生等模拟电路。

(2) 掌握如何用 Multisim 8 软件测试放大电路静态工作点和动态性能指标的方法。

(3) 熟悉由运算放大器组成的正弦波发生器的工作原理,并通过仿真软件分析元件参数的 变化对输出波形的影响。

【相关知识要点】

1. 半导体元件特性曲线的测试

在 Multisim 8 软件元件库中,二极管位于 Diodes 组,晶体管与场效应(MOS)管位于 Transistors 组。在两个元件组中,最顶端的元件族都是虚拟半导体元件,虚拟元件的参数是 Multisim 8 软件默认的参数,没有实际的元件与其对应,但是实际元件有一定的型号,也就是可以在市场上 买到。为了使仿真结果更加接近实际电路,建议在仿真电路中使用实际半导体元件库。

晶体管最重要的参数是电流放大倍数,在 Multisim 8 软件中其参数符号是 BF。双击晶体管的元件符号可以打开元件特性窗口,单击 Edit Model 按钮,打开如图 3.2.1 所示的模型编辑(Edit Model)窗口。在模型编辑窗口中可以方便地修改其各个参数,包括电流放大倍数 BF(位于第2行)。

| Value:<br>Footprint:<br>Manufacturer:<br>Function: | ZRI711<br>TO-39<br>Generic   | Edit ∎odel<br>.MODEL 2N1711_BJT_NPN_1 npn | -           |       |   |
|--|--|---|-------------|-------|---|
|  |  | Name                                      | Value       | Units |   |
|  |  | TS (transport saturation surrout)         | 0.00105721  | 54    |   |
|  | and a second sec | BE (ideal movimum forward hote)           | 462 242     | pn    | _ |
|  | Edit Component in DB   | NT (forward current emission coeffici     | 1 04308     |       |   |
|  | Zerry Comments An DP   | VAF (forward Forly voltage)               | 10          | v     |   |
|  | save component to bb   | IKE (corper for forward bets high cur     | 0.348346    | à     |   |
|  | Edit Footprint   | ISE (B-E leakage saturation current)      | 0.000144053 | DÅ    |   |
|  | Larc rootprine   | NE (B-E leakage emission coefficient)     | 1.15691     |       |   |
|  | Edit Model   | BR (ideal maximum reverse beta)           | 46.2242     |       |   |
|  |  | NR (reverse current emission coeffici     | 0.925137    |       |   |
|  |  | VAR(reverse Early voltage)                | 67.1766     | v     |   |
|  |  | IKR (corner for reverse beta high cur     | 3.48346     | A     |   |
|  |  | TCC (P=C, 1 as less an estimation annual) | 0.000144053 | 24    |   |

图 3.2.1 晶体管的模型编辑窗口

1) 用虚拟伏安分析仪测试晶体管的特性曲线

Multisim 8 软件的仪器仪表工具栏中提供了一种伏安分析仪(IV – Analysis),它可以测试二极管、晶体管和 MOS 管的特性曲线。单击仪器仪表工具栏上的 图标即可使用伏安分析仪。在电路编辑窗口双击其符号图可立即弹出其前面板,在右上方的 Components 下拉菜单中有 Diode、BJT PNP、BJT NPN、PMOS、NMOS 五种元件可供选择。

假设要测试特性曲线的晶体管的型号是 2N221,它是一个 NPN 型晶体管,按照分析仪前面 板右下方的接线示意图,将该晶体管接入伏安分析仪,单击仿真按钮,则其前面板立即给出如图 3.2.2 所示的该晶体管的输出特性曲线。



图 3.2.2 用伏安分析仪测试晶体管的输出特性曲线

这种伏安分析仪可以测试二极管的正向和反向特性曲线。但是只能测试晶体管和 MOS 管的输出特性曲线,要想测试它们的输入特性曲线,只能采用对仿真电路进行分析的方法进行测试。

2) 用直流扫描分析测试二极管的特性曲线

直流扫描分析(DC Sweep Analysis)用来对电路的独立电源进行扫描,输出扫描结果曲线,曲线的横坐标是被扫描的电源,纵坐标是节点电压或独立电源中的电流。

为了测试二极管(1N4007)的正向特性曲线,将该二极管与一个直流电压源相连接,并接上地(Ground)。选择 DC Sweep Analysis,在其参数设置对话框中选择扫描的电源 V1(该电路仅有 V1 一 个电源),起始电压设置为 0,结束电压设置为 2V,步长设置为 0.01V,然后在参数设置对话框的Output 标签中单击 More,选择输出二极管的电流(@dd1[id]),输出结果如图 3.2.3 所示。



图 3.2.3 二极管的正向特性曲线



3) 用直流扫描分析测试晶体管的特性曲线

在 Multisim 8 软件的电路编辑窗口输入如图 3.2.4 所示的晶体管测试电路。首先令基极电阻为零,将电压源 V1 作为直流扫描的第一个电源,扫描范围是 0~2 V,步长为 0.01 V;将 V2 作为扫描的第二个电源,扫描范围是 0~5 V,步长为 1 V,以基极电流为输出,则可得如图3.2.5(a) 所示的一组晶体管输入特性曲线。





其次再令基极电阻等于 100 kΩ,将电压源 V2 作为直流扫描的第一个电源,扫描范围是0~8 V,步 长为0.1 V,将 V1 作为扫描的第二个电源(其目的是为了给出不同的基极电流),扫描范围是0~10 V, 步长为1 V,以集电极电流为输出,则可得如图 3.2.5(b)所示的一组晶体管输出特性曲线。

在图 3.2.5(a) 所示的输入特性曲线中,最左边一条对应 U<sub>CE</sub> = 0 V,当 U<sub>CE</sub> 增大时,其特性曲线向右边平移,可以看出当 U<sub>CE</sub> > 1 V 时,输入特性曲线就基本上重合在一起了。

2. 用 Multisim 8 软件分析晶体管放大电路

在电路编辑窗口中绘制一个共射极放大电路,晶体管选用 2N2222A,将它的放大倍数设置为 50,电源电压为 12 V(选用电源组中的 VCC),基极偏置电阻用一个 600 kΩ 的电位器,集电极电阻 为 3 kΩ,负载电阻为一个 6 kΩ 的电位器,两个耦合电容为 4.7 μF。对该电路作如下的分析:

(1) 对基极偏置电阻进行参数扫描,分析其直流工作点,找出使 U<sub>CE</sub>为6V 左右时,基极电阻应为多大。

(2)调节基极偏置电阻为上一步确定的数值,然后在放大电路的输入端接上有效值为 10 mV、频率为1 kHz的正弦信号,用双通道示波器观测其输入、输出电压波形,改变负载电阻的 大小并注意观测输出波形的变化情况。

(3) 取负载电阻为3kΩ,用转移函数分析法分析其电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

(4)对放大电路进行交流分析,将信号源的幅值设置为1V,起始频率为1Hz,结束频率为 1GHz,每十倍频程计算40个点,纵轴线性坐标。取负载电阻为3kΩ,分析输出电压,用测试光标测量放大电路的中频放大倍数,并测量上、下限截止频率,计算出放大电路的通频带。

(5) 用示波器观测输出电压波形,调节基极偏置电阻,观测饱和失真与截止失真现象;增大 输入信号的幅值,观测大信号失真现象。

3. 用 Multisim 8 软件分析运算放大器电路

在 Multisim 8 软件的元件库中有两类运算放大器,一类是虚拟的运算放大器,另一类是实际 的运算放大器。虚拟运算放大器的参数可以在其特性窗口中进行设置,这些参数包括开环增益、 输入电阻与输出电阻等,因此,虚拟运算放大器与理想运算放大器是不同的。虚拟运算放大器没 有一定的封装参数与之对应,不能用于电路的布线,只能用于仿真,但是使用虚拟运算放大器的 优点是仿真速度最快。实际运算放大器与一定的产品型号对应,具有元件封装信息,因此,既可 以仿真也可以进行电路板的布线。注意在使用时一般不用修改其模型参数。

两类运算放大器均处于 Multisim 8 软件的主数据库的 Analog 组中。选择相应的元件族,在 右边的元件窗口中便可以列出其中所有的元件。虚拟运算放大器族中有虚拟比较器 (COMPARATOR\_VIRTUAL)、三端虚拟运算放大器(OPAMP\_3T\_VIRTUAL)和五端虚拟运算放大器(OPAMP\_5T\_VIRTUAL)。使用时,三端虚拟运算放大器无需再连接电源,而五端虚拟运算放 大器必须连接电源。由于实际运算放大器是与具体型号对应的器件,因此没有三端运算放大器, 使用时要连接电源,根据型号不同,有的还要外接调零元件等。对于没有专门指定运算放大器型 号的场合,通常采用三端虚拟运算放大器和虚拟比较器进行运算放大器电路的仿真和分析。

1) 运算放大器传输特性的测量

在 Multisim 8 软件电路编辑窗口输入如图 3.2.6 所示的运算放大器传输特性测试电路,对 差模输入的电压源 V1 进行直流扫描,扫描范围是 -1~1 V,步长为 0.01 V。运算放大器的输出 端接上一个负载电阻的目的是要求电路必须具备接地端。测试运算放大器的输出电压可得如图 3.2.7 所示的传输特性曲线,其正、负饱和电压约为 ±20 V。





图 3.2.6 运算放大器传输特性的测试电路图

图 3. 2. 7 直流扫描所得的运算放大器传输特性曲线

2) 零限电压比较器的仿真

在 Multisim 8 软件电路编辑窗口输入一个零限电压比较器,其中虚拟比较器的反相输入端

接地,同相输入端接上一个频率为1 kHz、有效值为2 V 的正弦电压,用虚拟示波器同时观测输入、输出电压的波形,如图 3.2.8 所示。从输出波形可以看出,这种虚拟比较器的输出饱和值分别为5 V和0 V。



图 3.2.8 零限电压比较器的输入、输出波形

4. 用 Multisim 8 软件分析直流稳压电源

一个直流稳压电源主要由变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路构成。Multisim 8 软件的元 件库中的变压器,同样分为实际元件和虚拟元件两大类。实际变压器处于 Multisim 8 软件主数 据库的 Basic 组中,其中 TRANSFORM 族中为线性变压器,NON\_LINEAR\_TRANSFORM 族中为非 线性变压器,它们中的每个元件都有实际的型号与之对应。也可以从主数据库的 Electro\_Mechanical 组、LINE\_TRANSFORM 族中选用实际变压器,甚至可以选用三相变压器。当我们对直 流稳压电源仿真需要变压器时,一般都选用 Basic 组、BASIC\_VIRTUAL 族中的虚拟变压器(TS\_ VIRTUAL)。双击其元件符号即可修改其各种参数,包括变比、漏电感、磁化电感以及一、二次绕 组的电阻。

对于整流电路,可以选用 4 个二极管构成整流电路,或者从主数据库的 Diodes 组、FWB 族中 选用各种型号的整流桥。对于稳压电路中的稳压二极管,可以选用虚拟二极管族中的虚拟齐纳 二极管(ZENER\_VIRTUAL),双击其元件符号即可修改反向击穿电压(reverse breakdown voltage) 等参数;或者从 Diodes 组、ZENER 族中选用实际的稳压二极管,双击其元件符号打开其特性窗 口,再单击 Edit Model 按钮即可查看并修改其反向击穿电压等参数。如要对三端稳压电路进行仿 真,应该从 Multisim 8 软件的主数据库的 Mics 组、VOLTAGE\_REGULATOR 族中选用比如 78 × × 、79 × × 系列的三端稳压元件。

【实验内容与步骤】

1. 共射极放大电路实验

完成本小节中"2. 用 Multisim 8 软件分析晶体管放大电路"共射极放大电路的实验内容,记录下

每一项测试的数据以及波形。然后在放大电路的输入端与输出端之间接入一个 50 kΩ 的电阻,形成 负反馈放大器,在 Ucr 为 6 V 左右时再用转移函数分析法分析其电压放大倍数、输入电阻和输出电阻。

在负反馈放大器的输入端接上有效值为 10 mV、频率为 1 kHz 的正弦信号,调节基极偏置电阻,观测饱和与截止失真现象,与未引入负反馈时的输出电压波形相比较,说明负反馈是否能够改善放大电路的非线性失真。

2. 射极跟随器实验

在电路编辑窗口中绘制一个射极跟随器,晶体管仍选用 2N2222A,其放大倍数设置为 50,电 源电压为 12 V,基极偏置电阻为 200 kΩ,发射极电阻为 3 kΩ,耦合电容为 4.7 μF。

(1)测试并记录其静态工作点 在跟随器输入端接上有效值为 50 mV、频率为 1 kHz 的正弦 信号,输出端开路,用双通道示波器观测其输入、输出电压波形,观测输入、输出电压波形是否大小 相等、相位相同;用功率表分别测量输入信号和输出信号的功率,计算射极跟随器的功率放大倍数。

(2) 用转移函数分析法分析其电压放大倍数、输入电阻和输出电阻,说明射极跟随器有哪些特点。

3. RC 正弦波发生器实验

在 Multisim 8 软件的电路窗口中编辑一个 RC 正弦波发生器,运算放大器选用三端虚拟运算 放大器, C = 0.01 μF, 为了使输出信号的频率范围是 100 Hz ~ 2 kHz, 试确定选频网络中电阻 R 的取值范围。

假设运算放大器反相输入端的电阻 R<sub>1</sub> 取 10 kΩ,反馈电阻由两个电阻 R<sub>F1</sub>和 R<sub>F2</sub>串联组成, 其中 R<sub>F2</sub>再正、反向并联两只二极管,为了使输出既为不失真的正弦波信号,又能快速起振,试通 过仿真确定 R<sub>F1</sub>和 R<sub>F2</sub>的大小。

注意:由于在仿真软件中不会产生初始扰动,在启动仿真后应不断调节选频网络中可变电阻 R的大小,这样才会提供初始扰动使振荡建立起来。

#### 【实验报告要求】

(1) 绘制共射极放大电路与射极跟随器的电路图,记录下每一项测试数据与波形;试说明 共射极放大电路中引入反馈的类型,以及对输入电阻和输出电阻有什么影响;根据测试的射极跟 随器的性能指标和功率放大倍数,总结射极跟随器有什么特点。

(2) 在 RC 正弦波发生器中,运算放大器工作在什么状态? 调试过程中出现了哪些问题? 又是怎么解决的?

### 3.3 数字电路仿真实验

【实验目的】

(1) 掌握在 Multisim 8 软件平台上进行数字电路仿真实验的方法。

(2) 学会 Multisim 8 软件中逻辑转换仪和逻辑分析仪的使用方法。

(3) 学会运用 Multisim 8 软件分析和设计数字逻辑电路的方法。

【相关知识要点】

1. 数字集成电路的选用

在 Multisim 8 软件的元件库中,几乎可以找到各种常用的数字集成电路,可以通过芯片的型 号来查找各种数字集成电路。常用的 TTL 系列和 CMOS 系列数字集成电路分别位于 Multisim 8 软件的主数据库的 TTL 组和 CMOS 组,在 Misc Digital 组中包含一些常用的可编程逻辑器件、微 处理器、存储器等,在 Mixed 组中可以选用 555 定时器、数模和模数转换器等,在 Indicator 组中则 可选用发光二极管、七段数码管等显示器件。对于数字电路中的电源,则选用 Source 组、POWER\_SOURCES 族中的 VCC 和 VDD,用作 TTL 电路和 CMOS 电路的电源,并且选用 DGND 作 为数字地,另外将 Source 组、SIGNAL\_VOLTAGE\_SOURCES 族中的 CLOCK\_VOLTAGE 作为频率 和幅值都可修改的时钟信号。

假设我们要编辑一个由与非门构成的电路,则可在 TTL 组、74LS 族中选择型号为 74LS00D 的芯片。由于该芯片包含了 4 个二输入的与非门,因此选中该芯片后将出现一个如图 3.3.1(a) 所示的按钮面板,这表示你可以任意选用该芯片中编号为 A、B、C、D 的 4 个与非门,如还需要第 2 个芯片的与非门,则只需单击 New 后面的字母按钮即可,单击 Cancel 按钮表示这种门电路已 经输入完毕,如图 3.3.1(b)所示。在 Multisim 8 软件中用这种方式不仅可以快捷、迅速地输入门 电路,同时也便于在 PCB 板上自动布线。



图 3.3.1 在电路编辑窗口中输入门电路

该仿真软件中的门电路和多数集成芯 片都不提供电源端,在仿真时也无需另接 电源,但是在 PCB 板布线时会自动接上电 源。如果一些芯片提供了电源和接地端, 那么在仿真时就必须接上电源和地线。

2. 组合逻辑电路的功能测试

1) 用发光二极管测试输出电平

图 3.3.2 所示为与非门的逻辑功能 测试电路,其中发光二极管选自 Multisim 8 软件的主数据库 Indicator 组、PROBE 族





中的 PROBE RED(红色发光二极管),输入端分别用两个单刀双掷开关控制高、低电平的接入。 电路编辑完毕后,单击工具栏上的仿真按钮,当输出为高电平时,发光二极管则会发光(如图 3.3.2 所示)。通过这种方式可测试任何组合逻辑电路的逻辑功能。

如果要测试一个七段译码器的逻辑功能,则应该从 Multisim 8 软件的主数据库 Indicator 组、 HEX DISPLAY 族中选用七段译码器,其中 SEVEN SEG COM A 系列用于共阳极七段数码管, SEVEN SEG COM K 系列用于共阴极七段数码管。

2) 用逻辑转换仪分析和设计组合逻辑电路

逻辑转换仪(Logic Converter)的图标位于仪器仪表工具栏上,该转换仪可以实现真值表、逻 辑函数表达式、逻辑电路图的相互转换、甚至可以将逻辑函数表达式化为最简的与或表达式。

逻辑转换仪共有9个接线端,其中前8个端子在其前面板上标记为A~H,它们应接入组合 逻辑电路的输入端,最后一个端子 OUT 接组合逻辑电路的输出端。现在我们用逻辑转换仪测试 一个二输入与非门的逻辑功能,由于该与非门只有两个输入端,则将其输入端与逻辑转换仪连接 时,可以选用逻辑转换仪前8个端子中的任意两个,其接线图如图3.3.3所示。



图 3.3.4 逻辑转换仪的前面板

电路编辑完毕后.双击逻辑转换仪的符号图即可打开其前面板,如图 3.3.4 所示。其前面板 主要分为3个区域,即真值表区、逻辑函数表达式区和逻辑功能转换按钮。这里有6个按钮,从 上到下分别代表:将逻辑电路转换为真值表,将真值表转换为最小项之和的表达式,将真值表转 换为最简与或表达式,将逻辑函数表达式转换为真值表,将逻辑函数表达式用与、或、非门组合电 路实现,将逻辑函数表达式只用与非门电路实现。真值表和逻辑函数表达式都可以人工输入,逻 辑函数表达式 A 的反变量用 A'表示。

3. 用逻辑分析仪分析时序逻辑电路

对于时序逻辑电路,如果我们输入了时钟信号,则可通过示波器来分别观察各路输出的波 形,如果要同时观测多路输出的波形,最好采用逻辑分析仪(Logic Analyzer)。逻辑分析仪是利 用时钟信号从测试设备上采集和显示数字信号的仪器,其最主要的作用在于时序判定。逻辑分 析仪不像示波器那样有许多电压等级,通常只显示两个逻辑电平(1和0),因此设定了参考电压 后,逻辑分析仪将被测信号通过比较器进行判定,高于参考电压者为 High,低于参考电压者为 Low,在 High 与 Low 之间形成数字波形。

图 3.3.5 所示为用逻辑分析仪测试二 – 十进制计数器 74LS90 芯片时序功能的接线图,其中

将 74LS90 芯片连接成为十进制计数器,输入时钟信号的频率为1 kHz。Multisim 8 软件提供的逻辑分析仪共有 16 个通道,这里任意选用了其中的5 个通道观测4 个输出和时钟信号的波形。单击工具栏上的仿真按钮,双击其符号图即可得到如图 3.3.6 所示的波形图。逻辑分析仪除了 16 个输入通道以外,还有 C、Q、T 三个输入端,只有逻辑分析仪使用外部时钟作为采样信号时才会用到这三个输入端。通常在用逻辑分析仪对时序逻辑电路进行测试时采用内部时钟信号,单击其前面板图上 Clock 块中的 Set 按钮,则可选择使用内部时钟或外部时钟信号。



图 3.3.5 用逻辑分析仪测试计数器的波形



图 3.3.6 逻辑分析仪显示的波形图

【实验内容与步骤】

1. 组合逻辑电路的分析实验

(1) 在 Multisim 8 软件中选用 3 线 - 8 线译码器 74LS138D,每个输入端通过单刀双掷开关 以切换高、低电平,输出端接上发光二极管,接好电路后启动仿真,列出其真值表。

(2) 在 Multisim 8 软件中选用 BCD 七段译码器 7447N,其输出端接上共阳极七段数码管,分别测试其数据输入端和控制端,并列出真值表。

2. 组合逻辑电路的设计实验

设计一个简单的数值比较器,比较两个1位数A和B的大小,不外乎有三种情况:A>B、A < B、A=B。设置3个输出端,以Y<sub>1</sub>=1表示A>B、Y<sub>2</sub>=1表示A<B、Y<sub>3</sub>=1表示A=B。

(1) 列出比较器的真值表,用与、或、非门实现该电路;

(2) 用逻辑转换仪将用与、或、非门实现的电路转换为全部用与非门实现的电路。

3. 双向移位寄存器的功能测试实验

在 Multisim 8 软件中选用移位寄存器 74LS194,每个输入端通过单刀双掷开关切换高、低电 平,输出端接发光二极管,接好电路后启动仿真。首先对 CLR 端输入一个负脉冲,实现"异步清 0"功能,再根据"并行输入"功能要求,将 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 使能端置于 11 状态,4 个数据输入端设为 1011 状态。观察时钟 CLK 端加单脉冲时,输出端发光二极管的变化情况,列出其功能表。

然后分别改变 S<sub>1</sub>和 S<sub>2</sub>使能端的状态,测试其左移、右移和数据保持功能,并列出其功能表。

4. 六十进制计数器的设计实验

通过两片 74LS90 芯片与基本门电路,应用复位法或置位法设计一个六十进制计数器,用逻辑分析仪观测各输出端的波形并作记录,然后将两个计数器的数据输出端通过七段译码器 7447N 接上七段数码管,其时钟端输入单脉冲或频率为1 Hz 的脉冲信号,观测是否具有六十进制计数的功能。

### 【实验报告要求】

(1) 绘制组合逻辑电路分析与设计实验中的电路图,列写出真值表,并简要说明3线-8线 译码器 74LS138D 和七段译码器 7447N 的工作原理。

(2) 绘制移位寄存器 74LS194 的功能测试电路,列写出其逻辑功能表,并简要说明其工作 原理。

(3) 绘制由 74LS90 芯片组成的六十进制计数器的电路图,并记录各输出端的波形。