

高等学校教材

电子技术 虚拟实验

吴培明 编著

机械工业出版社

本书是新编的电子技术虚拟实验参考教材。该书是根据原国家教委高教司 1995 年修订的“高等学校工科本科基础课程教学基本要求”，应用优秀仿真软件 EWB，将先进的计算机技术与电子技术结合起来，为读者建立的一个“计算机里的电子实验室”。用计算机学习电子技术，做虚拟实验，设计电路，既方便快捷，又轻松愉快，可取得事半功倍的效果。

书中以演示软件 Ewb4demo 引导读者快速入门，接着介绍电子工作平台主菜单命令的基本用法，最后为读者提供 68 个电路理论、模拟电路和数字电路计算机仿真实验的详细资料。

本书通俗易懂，内容丰富，图文并茂，顺应“以虚代实”、“以软代硬”的时代潮流，对本专科院校师生、电子工程技术人员和广大电子爱好者都有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术虚拟实验/吴培明编著. —北京：机械工业出版社，1999.9
高等学校教材
ISBN 7-111-07469-6

I. 电… II. 吴… III. 电子技术-模拟电路-高等学校-教材
IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 40666 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：王小东 版式设计：霍永明 责任校对：申春香
封面设计：姚 毅 责任印制：路 琳
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·15.25 印张·371 千字
0 001-5 000 册
定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

前 言

《电子技术虚拟实验》是一本用 EWB4 软件在计算机上做电子电路虚拟实验的实用教材。EWB 为 Electronics Workbench 的缩写，称为电子工作平台，是一种在国外高校和电子技术界广为应用的优秀计算机仿真设计软件，被誉为“计算机里的电子实验室”。其特点是图形界面操作，易学、易用，快捷、方便，真实、准确，可实现大部分硬件电路实验的功能。该软件以 Pspice 为内核，由 Interactive Image Technologies Ltd.公司研制开发。

电子工作平台的设计试验工作区好像一块“面包板”，在上面可建立各种电路进行仿真实验。平台上存放着数字电流表、数字电压表、数字万用表、双通道 1000MHz 数字存储示波器、999MHz 数字函数发生器、可直接显示电路频率响应的波特图仪、8 路数字信号逻辑分析仪、8 位数字信号发生器，还有可进行逻辑表达式和逻辑电路图相互转换的逻辑转换器。这些虚拟仪器随时可以拖放到工作区对电路进行测试，并直接显示有关数据或波形。EWB4 的器件库可为用户提供 350 种常用模拟和数字器件，设计和试验时可任意调用。经过扩充以后库里的器件门类可达 10 000 种以上。虚拟器件在仿真时可设定为理想模式和实模式。有的虚拟器件更是新奇，发光二极管可以发出红绿蓝光，逻辑探头像逻辑笔那样可直接显示电路节点的高低电平，继电器和开关的触点可以分合动作，熔断器可以烧断，灯泡可以烧毁，蜂鸣器可以发出不同音调的声音，电位器的触点可以按比例移动改变阻值。电子工作平台为用户造就了一个集成一体化的设计试验环境，建立电路、实验分析和结果输出在一个集成菜单系统中可全部完成。该软件的分析功能十分强大，可进行直流工作点分析，暂态和稳态分析。高版本的 EWB 还可以进行傅立叶变换分析、噪声及失真度分析、温度扫描、灵敏度分析、零极点和蒙特卡罗等多项分析。

电子工作平台的运行环境为 Windows95 或 98，8MB 以上内存和 10MB 以上硬盘空间。对电路进行设计和实验仿真的基本步骤是：用鼠标在工作区建立电路；对元件选定模式、数值和标号；接入信号源；连接虚拟仪器；选择分析功能和参数；激活电路进行仿真；保存电路图和仿真结果。

本书主要包括三部分内容。第一部分结合演示软件 Ewb4demo 学习电子工作平台的图形界面、基本操作方法、虚拟仪器和器件的初步应用，演示多种电路的仿真实验，力求快速入门。为了方便学习，还列有部分英文说明。第二部分介绍 EWB 软件的安装、启动和主菜单命令的基本使用方法，为深入学习和应用打好基础。第三部分是根据原国家教委高教司 1995 年制订的高等学校电路及电子技术课程基本要求，选编的 68 个电路理论、模拟及数字电子技术基础的虚拟实验，主要内容包含各种直流电路、交流电路、稳态分析、暂态分析及虚拟仪器的应用。对每个实验项目都列出了实验目的、实验器材、与实验相关的基础知识、实验步骤和思考题，并给出实验电路图。电子技术虚拟实验特有的交互性，可加深读者对电子电路基本概念和基础理论的理解，有利于逻辑思维、培养工程观点和分析与解决问题的能力。另外还可以在电子工作平台上做各种设计性实验，这对增强电路设计的能力和培育创新

精神是很有帮助的。书中采用欧美国家流行的电路元件符号，主要原因是只有用这种符号才能在电子工作平台上进行虚拟实验，符号的图形和名称可参考本书 1.7 节“器件库 Parts bins”。

书中应用优秀仿真软件将先进的计算机技术与电子技术结合起来，为电工电子课程的教学改革打开了一个窗口。学生一旦掌握了 EWB 软件的基本操作，便可在教师的指导下用这本教材在计算机上进行自学，对有关课程内容进行分析和计算，做开放性实验和设计性实验，完成课外作业。教师可用它来帮助备课，研究电路中的难题，精简课堂教学内容，取代部分硬件电路实验，可取得事半功倍的效果。教师教得轻松，学生学得主动，省时省钱又省工。

电子爱好者都希望有一间属于自己的实验室，现在只要有一台计算机加一套 EWB 软件再加上 一本虚拟实验教材，就相当于拥有一个设备先进的虚拟电子实验室。在这个实验室里学习电工学、电路理论、模拟电子技术和数字电子技术，做虚拟电子实验，进行电路设计，是一件轻松愉快的事情。“以虚代实”、“以软代硬”，是当代发展的潮流之一。相信在不久的将来，喜爱虚拟电子技术的电子爱好者和大学生在我国会越来越多。

本书可作为普通高校、电大、成人高校电类和非电类专业电子技术课程的计算机辅助教材使用，也可供高校师生、电气工程技术人员和电子爱好者参考。

在本书编写过程中，得到了清华大学阎石教授和华北工学院张建华教授的热情帮助和指导；广西大学谭振强教授审阅了全部书稿并写出了详细书面意见；“全国高等学校电子技术研究会”和广西工学院的同行也提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

因编者水平有限，错误和不当难免，恳请批评指正。

编者

1999.6.18

目 录

前 言

第一章 电子工作平台EWB4

快速入门 1

1.1 用演示软件DEMO学习使用EWB4 1

1.2 怎样在电子工作平台上建立实验 电路 3

1.3 虚拟电路实验演示 5

1.4 虚拟模拟电路实验演示 6

1.5 虚拟数字电路实验演示 9

1.6 EWB上的虚拟仪器 11

1.6.1 数字万用表(Multimeter) 12

1.6.2 信号发生器(Function Generator) ... 12

1.6.3 示波器(Oscilloscope) 13

1.6.4 波特图仪(Bode Plotter) 13

1.6.5 数字信号发生器(Word Generator) 14

1.6.6 逻辑分析仪(Logic Analyzer) 15

1.6.7 逻辑转换器(Logic Converter) 15

1.7 器件库(Parts Bins) 17

第二章 电子工作平台EWB4

的菜单和命令 22

2.1 电子工作平台 EWB4 的运行环境 ... 22

2.2 EWB4的安装 22

2.3 EWB4的启动 22

2.4 EWB4工作窗口简介 23

2.4.1 标题条 23

2.4.2 菜单条 24

2.4.3 虚拟仪器图标条 24

2.4.4 器件库图标条 24

2.4.5 仿真电源开关 25

2.4.6 器件库显示区 25

2.4.7 EWB4的工作区 25

2.5 EWB4的菜单和命令 25

2.5.1 文件菜单(File Menu) 25

2.5.2 编辑菜单(Edit Menu) 27

2.5.3 电路菜单(Circuit Menu) 28

2.5.4 窗口菜单(Window menu) 33

2.5.5 帮助菜单(Help) 34

第三章 虚拟电路实验 35

实验3.1 直流电路中的电压和电流 35

实验3.2 欧姆定律 36

实验3.3 基尔霍夫电压定律和 串联电阻电路 39

实验3.4 基尔霍夫电流定律和 并联电阻电路 40

实验3.5 串-并联电路 42

实验3.6 分压器和分流器 45

实验3.7 直流电路中的电功率 47

实验3.8 直流电路的节点电压分析 50

实验3.9 直流电路的网孔电流分析 52

实验3.10 戴维南和诺顿等效电路 53

实验3.11 示波器和信号发生器的使用 ... 56

实验3.12 电容器的串联和并联 59

实验3.13 电容器的充电和放电 62

实验3.14 电感的串联和并联 64

实验3.15 电感中的过渡过程 67

实验3.16 RLC电路中的过渡过程 70

实验3.17 交流电压和电流的有效值 73

实验3.18 感抗 76

实验3.19 容抗 79

实验3.20 串联交流电路的阻抗 82

实验3.21 并联交流电路的导纳 86

实验3.22 交流电路的功率和功率因数 ... 91

实验3.23 串联交流阻抗与基尔霍夫 电压定律 95

实验3.24 并联交流导纳与基尔霍夫 电流定律 99

实验3.25 交流电路的节点分析	102	实验4.18 低频放大器的频率响应	162
实验3.26 交流电路的网孔分析	104	实验4.19 高频放大器的频率响应	165
实验3.27 交流电路的戴维南等效 电路	105	实验4.20 运算放大器的频率响应	167
实验3.28 串联谐振	108	实验4.21 文氏桥振荡器	170
实验3.29 并联谐振	112	实验4.22 电容三点式振荡器	173
实验3.30 无源滤波器与波特图	115	实验4.23 有源带通滤波器	175
第四章 虚拟模拟电子技术实验	121	实验4.24 运放稳压器与恒温 控制器设计	176
实验4.1 半波整流电路	121	第五章 虚拟数字电子技术实验	181
实验4.2 桥式整流电路	122	实验5.1 逻辑代数与逻辑门电路	181
实验4.3 整流滤波电路	124	实验5.2 与非门和或非门	185
实验4.4 NPN三极管分压偏置电路	126	实验5.3 异或门与同或门	189
实验4.5 小信号共射放大器	128	实验5.4 组合逻辑电路分析	192
实验4.6 两级阻容耦合放大器	131	实验5.5 半加器和全加器的设计	195
实验4.7 射极跟随器	133	实验5.6 数值比较器	197
实验4.8 乙类推挽功率放大器	136	实验5.7 译码器和编码器	199
实验4.9 结型场效应管JFET偏置电路	140	实验5.8 四位数BCD加法器	204
实验4.10 结型场效应管小信号 共源放大器	142	实验5.9 RS和D触发器	206
实验4.11 差动放大器	144	实验5.10 边沿触发器	210
实验4.12 集成运算放大器的 参数测试	147	实验5.11 单稳态触发器和 多谐振荡器	217
实验4.13 串联电压负反馈放大器	150	实验5.12 异步计数器	220
实验4.14 反相比例放大器	151	实验5.13 D/A转换器	230
实验4.15 加法电路	153	实验5.14 A/D转换器	234
实验4.16 积分电路和微分电路	156	参考文献	238
实验4.17 比较电路	159		

第一章 电子工作平台EWB4快速入门

1.1 用演示软件DEMO学习使用EWB4

首先让我们用Ewb4demo演示软件初步学习使用电子工作平台EWB4。EWB4DEMO.EXE文件已装在另外提供的3.5in软盘中，可在Windows95或98中直接使用，也可复制到硬盘上使用。

打开计算机电源，进入Windows95，把装有Ewb4demo软件的软盘放进相应的磁盘驱动器，双击桌面“我的电脑”图标，再双击3.5in软盘驱动器图标，就会出现Ewb4demo的图标，如图1-1所示。

双击Ewb4demo图标，就得到图1-2所示的Electronics Workbench 的学习界面。

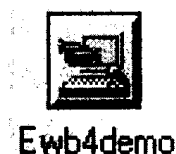


图1-1 Ewb4demo 图标

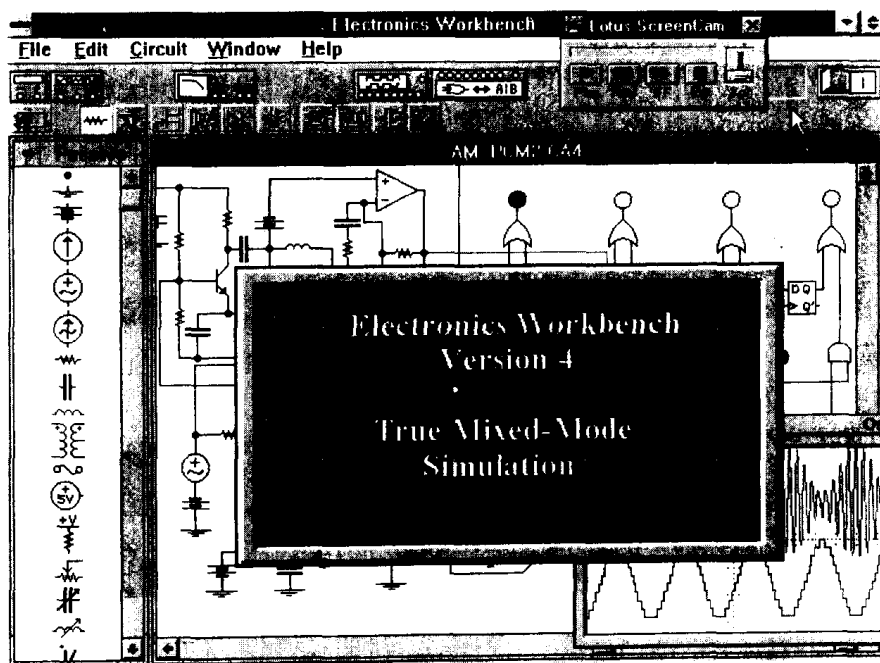


图 1-2 Ewb4demo 学习界面

界面的中间有一个描述框，用英文说明：电子工作平台第4版，真正的混合模式仿真。描述框的背景是一个比较复杂的模拟/数字与分立/集成电子电路及其波形图；描述框的右上方显示了一个名为 Lotus Screencam 的控制盒，如图1-3所示。

控制盒上有四个按钮：播放(Play)及暂停钮(Pause)，按第一次是播放，按第二次是暂停；重播钮(Rew)，按下后从新开始播放演示程序；快进钮(FF)，按下后可加快播放速度；退出钮(Exit)，当光标指向它并单

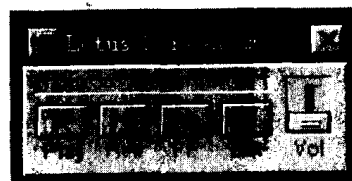
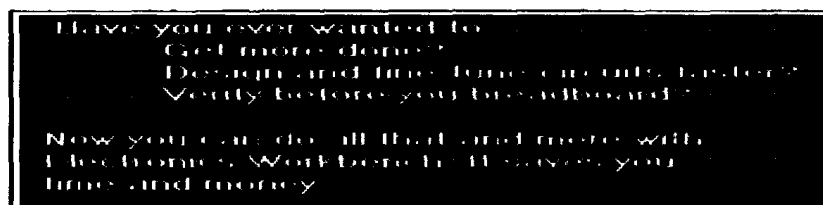
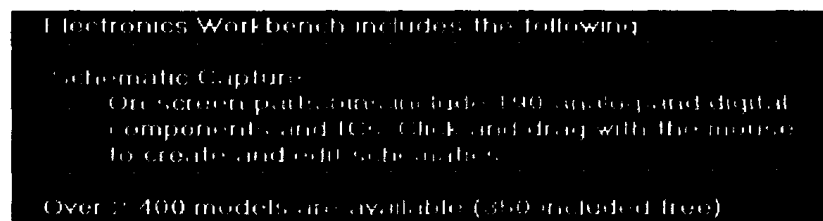


图1-3 控制盒

击左鼠标键便可停止播放，退出演示程序。接着出现的第二个描述框是：

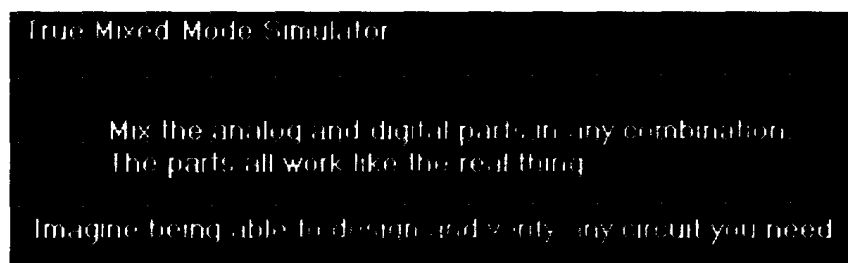


意思是：你曾想过要做得更多吗？电路设计和调试得更快吗？制作电路板前能测试吗？现在用电子工作平台就可以做好这一切，省时又省钱。

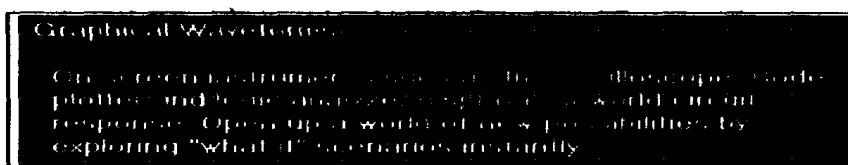


在电子工作平台上可做的事情包括：

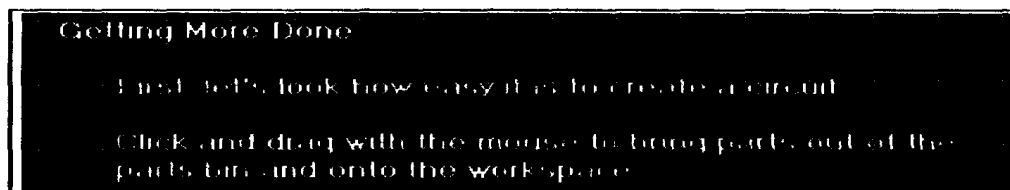
- 画电路图 屏幕上的器件库里有 190 个模拟电路器件、数字电路器件和集成电路。用鼠标单击有关器件并把它拖到工作区，便可建立和编辑电路。在平台上可利用的模型有 2400 多个(其中 350 个可免费使用)。



- 混合模式仿真 模拟器件和数字器件可任意混合排列，平台上的器件工作起来好象真的一样。你所需要的电路图可以进行设计和检测。



- 图示波形 屏幕上的虚拟仪器，如示波器、波特图仪和逻辑分析仪，可显示实际电路的频率响应。对于图示波形的可能性，可根据实际情况用 What if 命令进行试探。



在电子工作平台上能做的事情还有很多，首先让我们来看一看建立一个电路是多么的容易。

1.2 怎样在电子工作平台上建立实验电路

● 拖放器件到工作区

用鼠标左键单击器件库中的一个器件并把它拖放到平台的工作区，如图1-4所示。

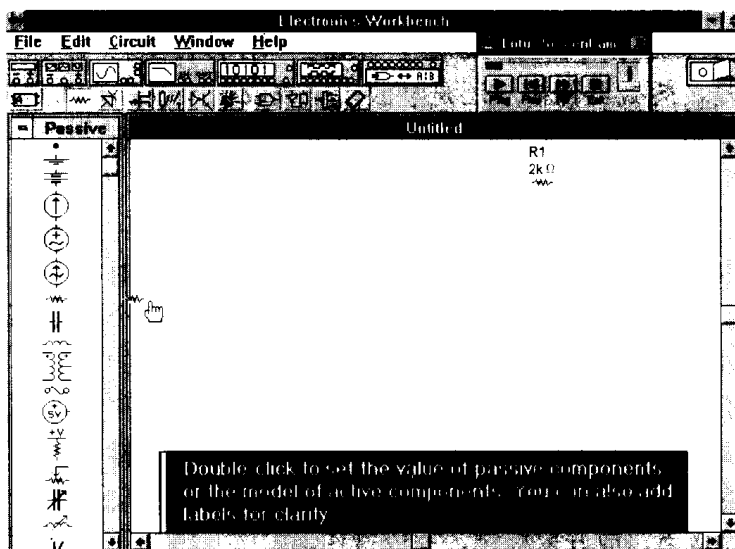


图 1-4 把电阻拖放到平台的工作区

● 对器件赋值

用鼠标双击器件，例如双击电阻，就出现一个赋值对话框，如图1-5所示。

改变电阻的数值和单位，单击接受按钮Accept，便可完成对器件的赋值。除了对无源器件赋值以外，还可以对有源器件模型进行赋值。



图1-5 电阻赋值对话框

● 对器件标号

为了方便看电路，可对电路中的器件进行标号。单击电子工作平台菜单条上的电路Circuit，就出现一个下拉式的电路菜单，如图1-6所示。再单击电路菜单中的标签命令Label，(如图1-7所示)，就会出现标签设置框，如图1-8所示。填上标签代号，如电阻R2，单击按钮OK，对有关器件的标号就完成了。

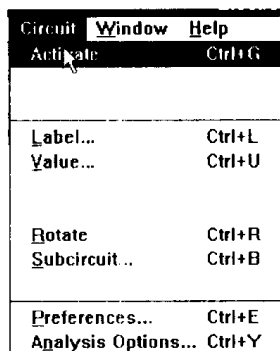


图 1-6 电路菜单 Circuit

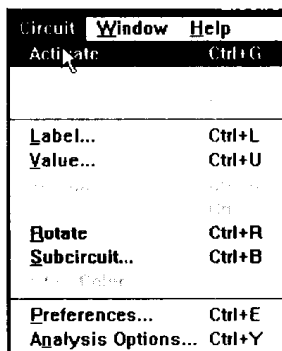


图 1-7 标签命令 Label

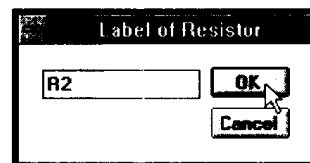


图 1-8 标签设置框

● 调整器件在电路中的位置和方向

为了使电路图画得整齐美观，可适当调整有关器件在电路中的位置和方向。调整位置的方法是用鼠标单击有关器件并把它拖放到合适的地方。

Click with the mouse to define connections. Notice that wires stay connected when you rearrange the parts.

调整方向指的是，想把器件横放还是竖放，顺放或是倒放。方法是用鼠标单击想要旋转的器件，再单击电路菜单Circuit及旋转命令Rotate，如图1-9所示。单击一次Rotate，有关器件就旋转90°。

● 连接电路

连接电路的基本方法是，把光标指向一个器件的接线端，这时就出现一个小黑点，按住鼠标左键，移动鼠标，使光标指向另一个器件的接线端，这时又出现一个黑点，放开鼠标键，这两个器件的接线端就连接起来了。值得注意的是，这时如果为了排列电路而移动其中一个器件，接线是不断开的。为了断开连接线，可用光标指向有关器件的连接点，这时出现一个小黑点，按下鼠标左键，拖动鼠标，连接线脱离连接点，放开鼠标键，完成操作。

Circuit Window Help	
Activate...	...
Stop	...
Measure	...
Label...	Ctrl+L
Value...	Ctrl+U
Find...	...
Rotate	Ctrl+R
Subcircuit...	Ctrl+B
Wire...	...
Preferences...	Ctrl+E
Analysis Options...	Ctrl+Y

图1-9 旋转器件

现在让我们在这个简单的分压电路中加上两个交流信号源(如图1-10所示)：打开无源器件库Passive，用鼠标对器件库中的交流信号源图标作两次单击和拖放操作，把信号源依次放到电子工作平台上，双击信号源图标，这时就出现一个交流信号源设置框 AC Voltage Source，调整电压Voltage、频率 Frequency 及相位Phase的数值和单位，再单击接受按钮Accept即可。

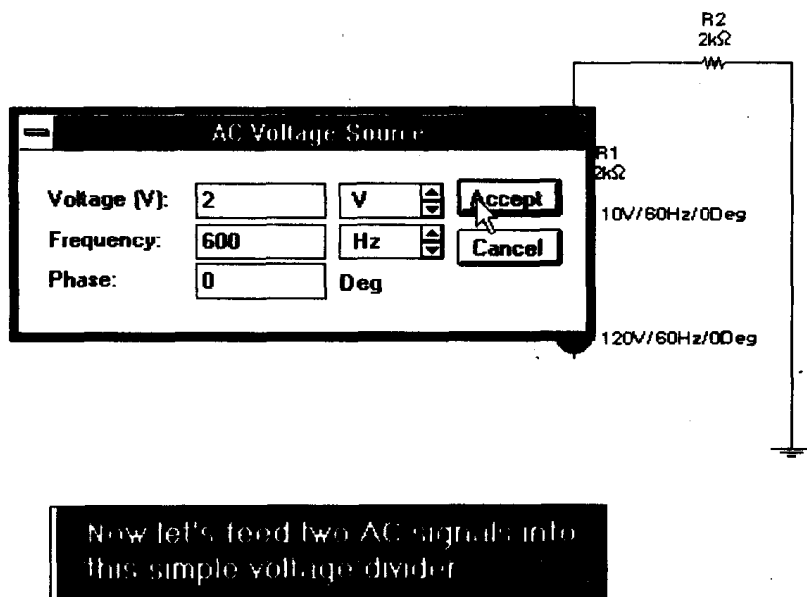


图 1-10 交流信号源的设置

连接电阻、信号源及接地极，在平台上建立电路的工作便完成了。这时可把示波器拖放到平台工作区，将示波器的测试端与电路的测试点用导线联好。示波器可用黑、红、绿、

兰、青、紫等6种颜色显示波形。为了选择波形的颜色(或导线的颜色),可双击示波器的连接线,这时出现一个颜色选择框Wire Color,如图1-11所示,单击想要的颜色小方块就行了。

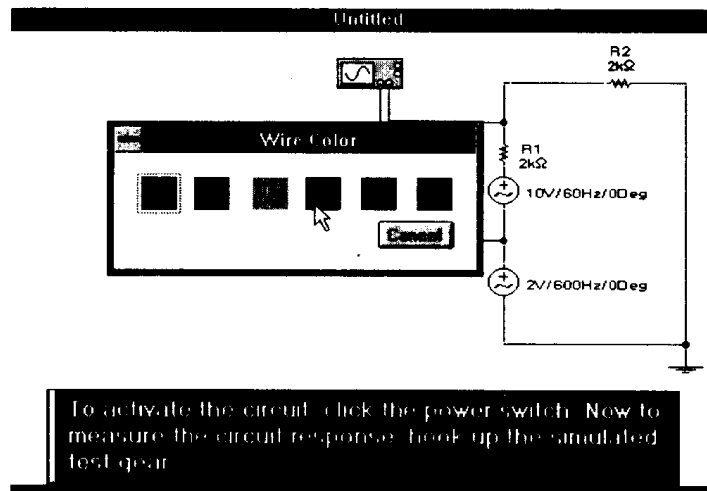


图 1-11 选择示波器的波形显示颜色

Alter component values without constantly adjusting the simulator. Everything is integrated seamlessly so you spend time analyzing your design, not fighting the software.

1.3 虚拟电路实验演示

现在要测量电路响应,可挂上仿真试验装置,调出示波器的实验面板。方法是双击示波器图标,激活示波器,如图1-12所示。为了激活电路,单击电源开关,如图1-13所示。这时虚拟示波器的面板上就能显示出响应曲线的波形,如图1-14所示。



图1-12 激活示波器

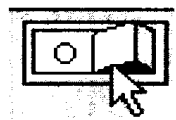


图1-13 激活仿真电源开关

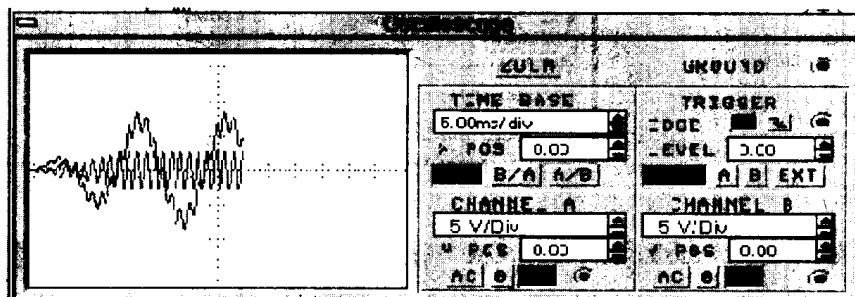


图 1-14 分压电路响应曲线波形

改变器件参数后不用调整仿真器,一切事情都可天衣无缝地自然做好。这样你就可以集中精力去分析你的设计,而不必顾虑仿真软件。

现在把R2的阻值改为5kΩ,单击电源开关,结果如图1-15所示。显然,调幅波的幅度变大了。完成虚拟电路实验后,如果再次单击电源开关,便可结束仿真。你看,建立和分析

一个简单电路有多快！现在让我们来看一些更有趣的东西。

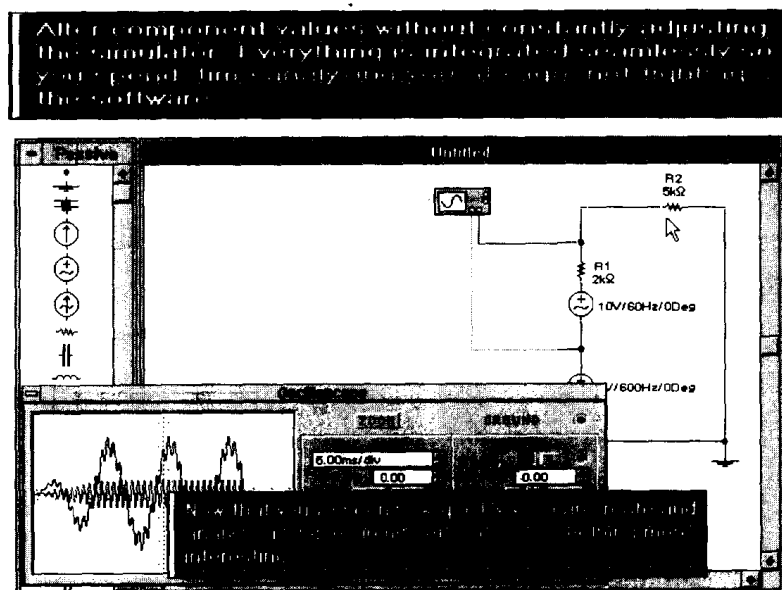


图 1-15 R2 的阻值改为 5kΩ 的实验情况

1.4 虚拟模拟电路实验演示

我们用存放在EWB4电子工作平台中的示例电路来演示一下如何做虚拟模拟电子实验。在EWB中选择文件菜单File中的打开命令Open，如图1-16所示。这时就出现一个打开电路文件对话框 Open Circuit File，如图1-17所示。

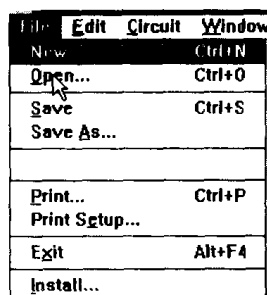


图 1-16 打开电路文件对话框

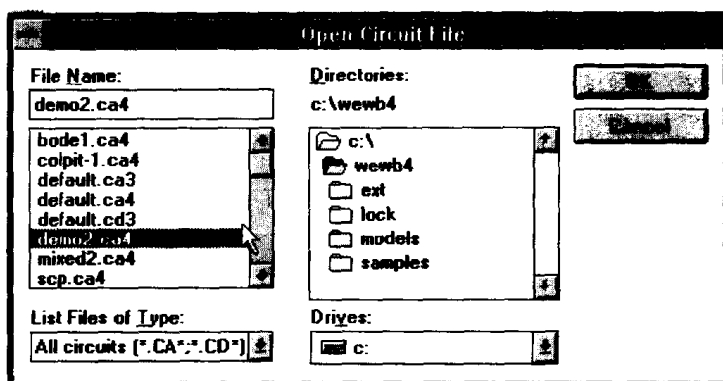


图 1-17 打开电路文件 Demo2.ca4

从文件目录中选择Demo2.ca4，单击OK按钮，这时又出现一个存盘对话框：Save changes made to Circuit Untitled？如图1-18所示，意思是对未定名电路所作的修改是否存盘？选择No，不存盘。

仪器放大器实验电路如图1-19所示，主要用于高速数据处理。电路使用的运算放大器为LM833，为了对比输入信号和输出信号的波形以及显示放大器的频率响应曲线，应用了示波器和波特图仪，通过双

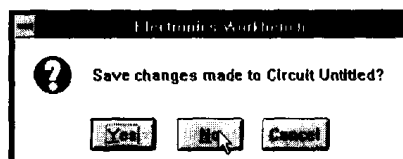


图 1-18 存盘对话框

击这两种仪器的图标，便可将仪器的虚拟面板调出来。

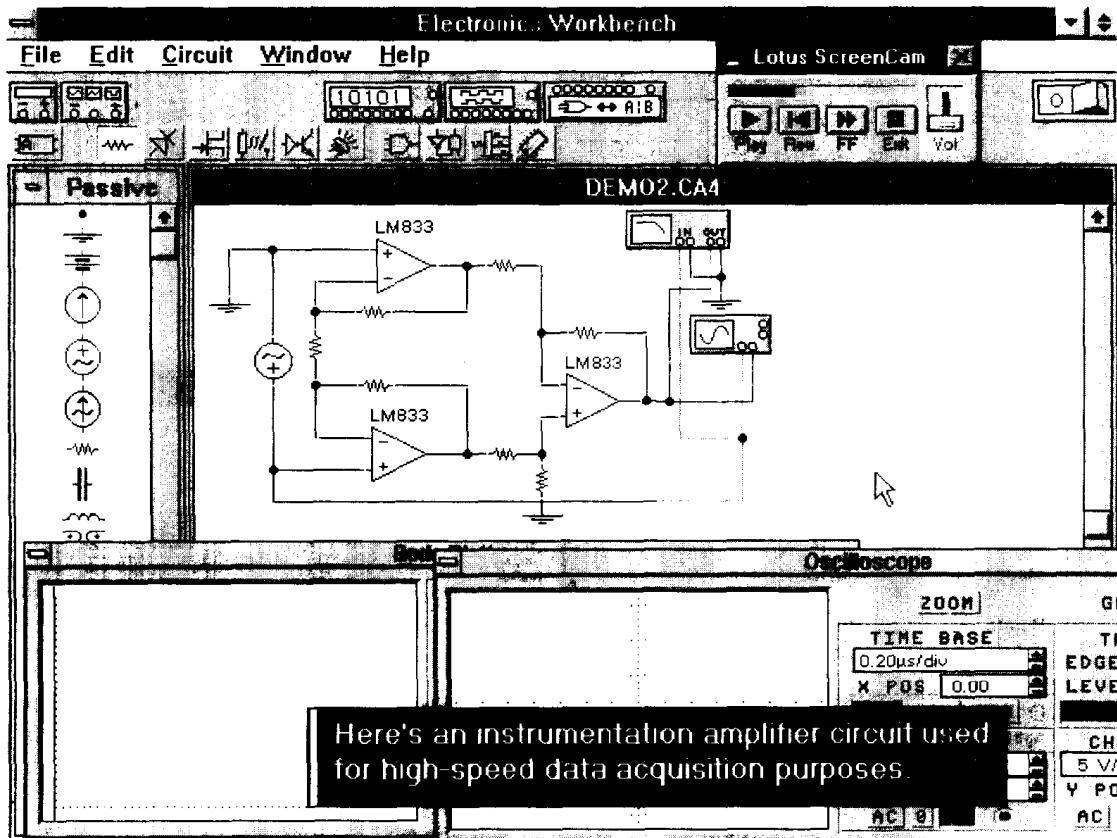


图 1-19 仪器放大器实验电路 Demo2.ca4

用鼠标左键单击仿真电源开关，从波特图仪和示波器的面板上可看到如图1-20所示的LM833 仪器放大器的频率响应及输入、输出特性曲线。

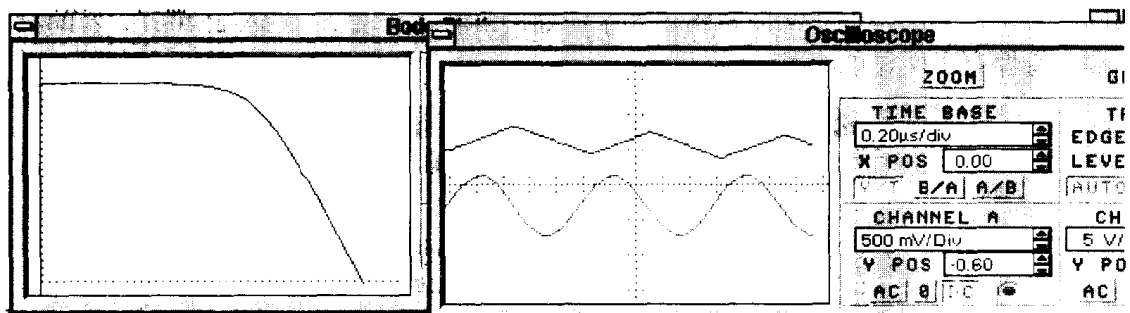


图 1-20 LM833 仪器放大器的频率响应和输入、输出特性曲线

显然，用LM833运算放大器得到的输出产生了失真。为了改善这个电路的特性，让我们试一试更灵敏的运算放大器。

为了更换运算放大器的型号，可用鼠标分别单击三个LM833，如图1-21所示，这时运放的符号变为实心。单击电路菜单Circuit，选择模式命令 Model，如图1-22所示。这时出现一个运放模式选择对话框Opamp Models，从库文件 Library 中选择ha××××，再从模式文件 Model 中选择 HA-2540，最后单击 Accept，如图1-23所示。这样电路中的普通运放LM833就换成高灵敏运放HA-2540了。

Using a LM833 opamp does not help output. To improve the circuit's performance, let's try a more expensive opamp.

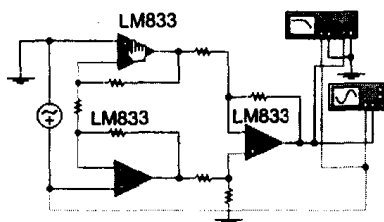


图 1-21 用鼠标单击 LM833 运算放大器

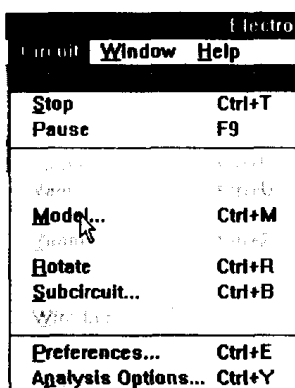


图 1-22 Model 命令

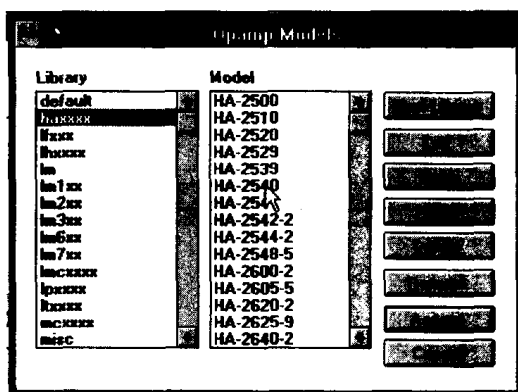


图 1-23 选择运放 HA-2540

If you want to examine the waveform in more detail, use the zoomed scope. Scroll backward or forward in time to focus on the time of interest.

为了激活这个电路，可用鼠标左键单击仿真电源开关，于是得到图1-24所示放大器的频率响应和输入、输出特性。从波特图仪和示波器的屏幕上可看到，HA-2540放大器的频率响应和输出特性有了明显的改善。

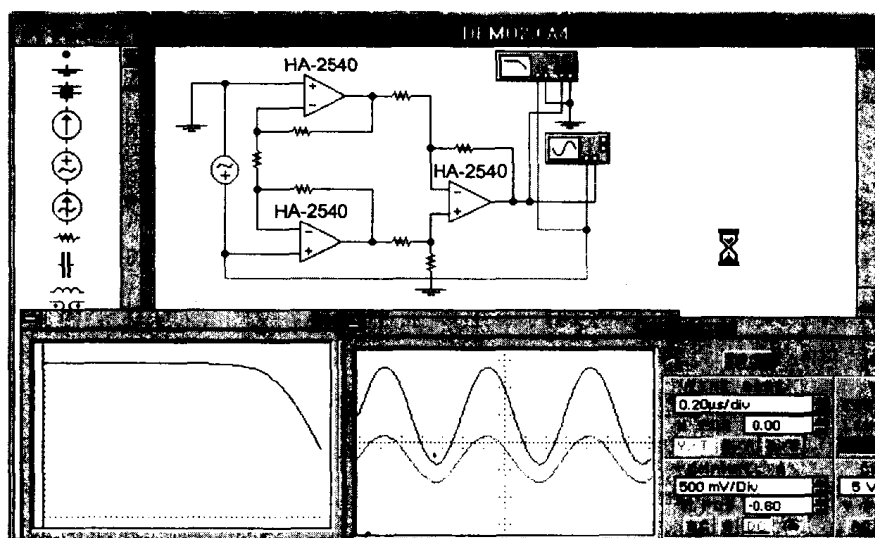


图 1-24 HA-2540 仪器放大器的频率响应和输入、输出特性

如果你想详细研究波形，可放大示波器的屏幕，移动游标读数。

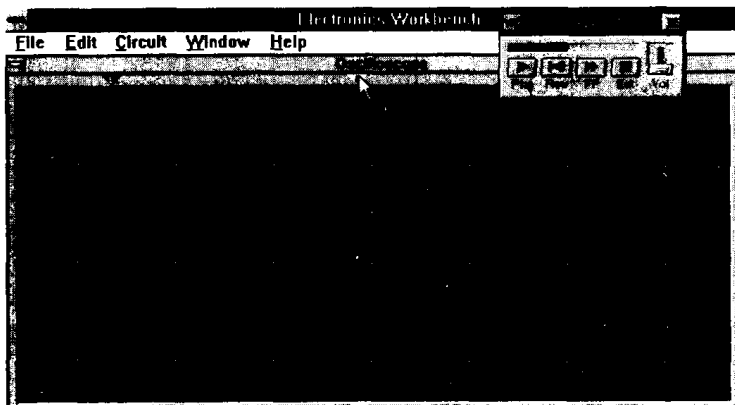


图 1-25 放大波形

用鼠标左键单击示波器虚拟面板上的Zoom按钮便可得到放大波形，如图1-25所示。为了精确读数可使用数显游标。要是乐意用电子表格进行分析，可以把仿真结果输入文本文件。

Mixed mode circuits work exactly the same way

混合模式电路同样可以精确地进行仿真。

1.5 虚拟数字电路实验演示

我们还是用存放在EWB中的示例电路来做一个数字电路实验。

选择电路菜单File中的打开命令Open，打开电路文件Mixed2.ca4，如图1-26及图1-27所示。

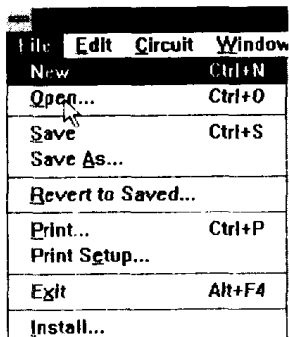


图 1-26 选择电路菜单

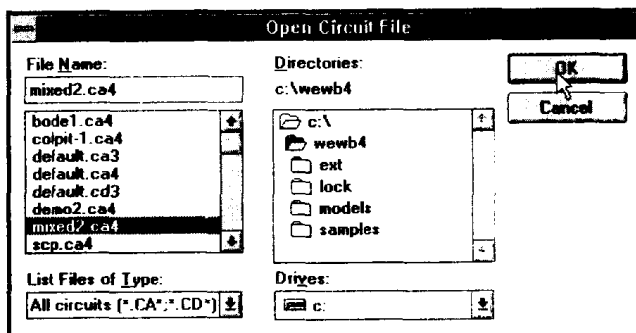


图 1-27 打开电路文件 Mixed2 ca4

这时出现一个存盘对话框，问对电路 Demo2.ca4 的修改是否存盘？选NO，如图1-28所示。

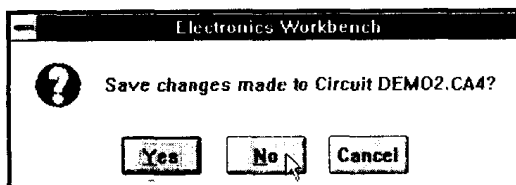


图 1-28 存盘对话框

Mixed2.ca4实验电路如图1-29所示。

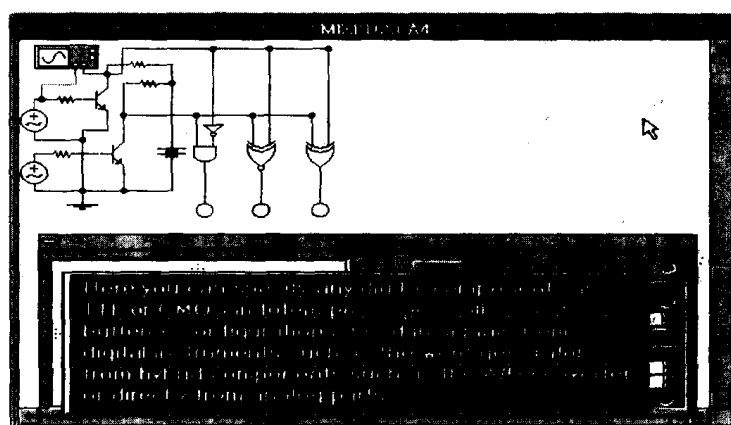


图 1-29 数字及模拟混合电路 Mixed2.ca4

在电路中可以指定任何形式的数字电路器件，例如TTL电路或 CMOS电路，这些电路可具有不同的引线。带有集电极开路三极管的电路可作为缓冲器来应用。信号可从字符发生器一类的数字仪器、A/D转换器一类的混和器件输入，也可从模拟器件直接输入。

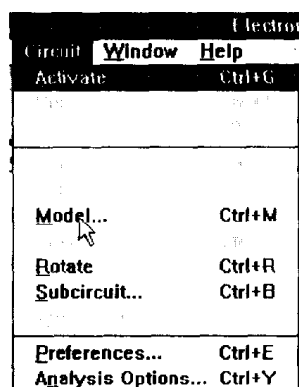


图 1-30 选择 Model 命令

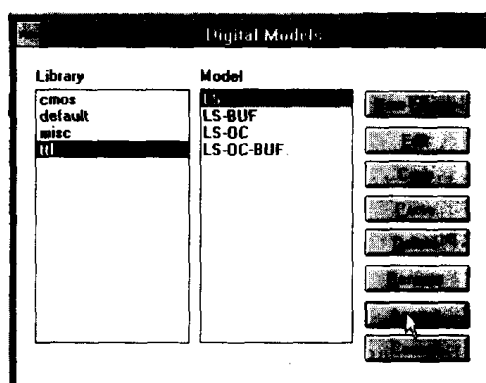


图 1-31 选定数字器件模式 LS

从电路菜单中选择模式命令(如图1-30所示)，再从数字器件模式Digital Models里选定LS模式(如图1-31所示)，单击 Accept，便可得到图1-32所示的含有LS型数字器件的电路。

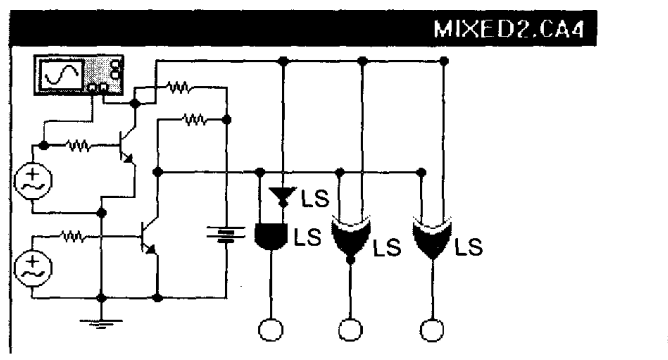


图 1-32 LS 型数字器件电路 Mixed2.ca4

为了激活这个电路，进行虚拟实验，可单击仿真电源开关，实验结果如图1-33所示。

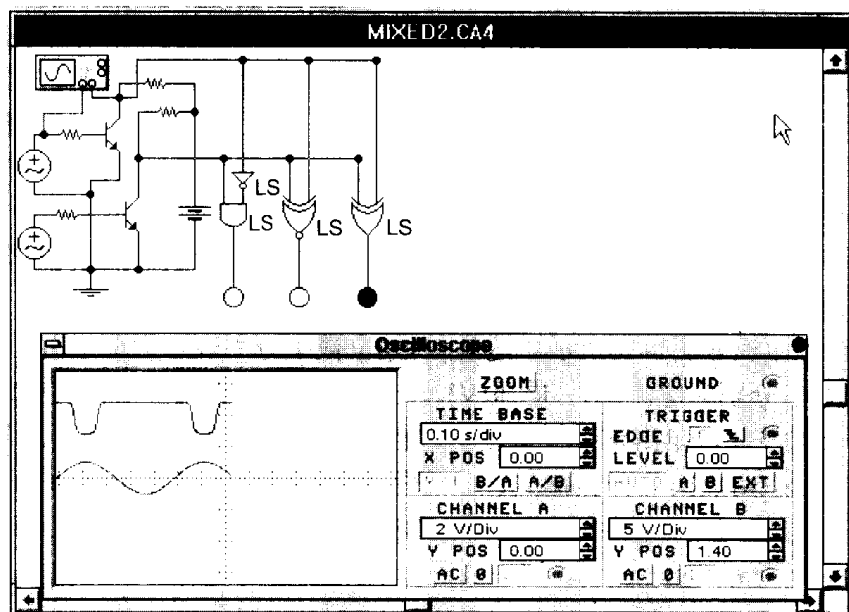
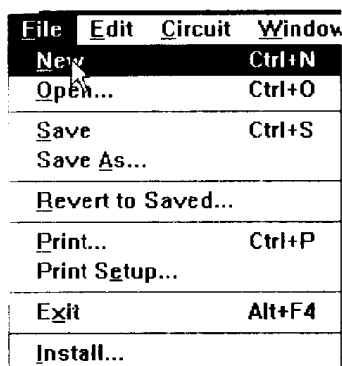


图 1-33 LS 型电路 Mixed2.ca4 虚拟实验

这就是用EWB做虚拟实验的大概情况，下面再来看看平台上的虚拟仪器和器件。

1.6 EWB上的虚拟仪器

先退出Mixed2.ca4实验，为此可选择文件菜单File中的新建命令 New，如图1-34所示，这时出现一个对 Mixed2.ca4 的修改是否存盘的对话框，如图1-35所示，选择NO。



This has been a brief overview of what Electronics Workbench offer.

Now here's a more detailed look at specific instruments and components.

图 1-34 单击新建命令

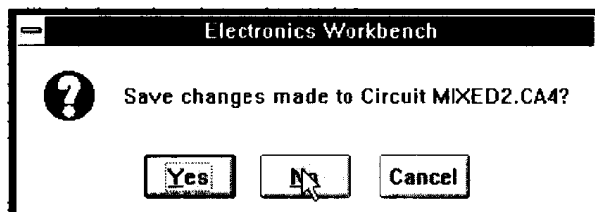


图 1-35 对 Mixed2.ca4 的修改不存盘

虚拟仪器是一种具有虚拟面板的计算机仪器，主要由计算机和控制软件组成。操作人