

全国普通高等院校电子信息规划教材

电路分析仿真 实验教程

李学明 主编

徐礼明 赵桂云 李娜 许燕萍 副主编

WORLDWIDE
WORLDWIDE



清华大学出版社

内容简介

本书可作为高等院校电子信息类专业及相关专业的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

全国普通高等院校电子信息规划教材

电路分析仿真 实验教程

李学明 主编

徐礼明 赵桂云 李娜 许燕萍 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书第1章到第8章的内容顺序和《电路分析》教材完全一致。只要拥有一台电脑,安装上NI Multisim 11 仿真软件,就不再受时间、地点的限制,随时随地都可以做电路方面的仿真实验。通过仿真实验可以大大提高分析、理解问题的能力和培养创新能力。本书第9章介绍了NI Multisim 11 仿真软件的使用方法、仪器仪表的使用方法和仿真分析法的使用步骤,并配有例题,便于自学。

本书可以作为高等院校电子信息、自动化、通信类专业电路分析课程的辅助教材,也可供有关技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路分析仿真实验教程/李学明主编. —北京:清华大学出版社,2014

全国普通高等院校电子信息规划教材

ISBN 978-7-302-35711-7

I. ①电… II. ①李… III. ①电路分析—实验—高等学校—教材 IV. ①TM133-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第060795号

责任编辑:焦虹 薛阳

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:19.75

字 数:488千字

版 次:2014年10月第1版

印 次:2014年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.50元

产品编号:053090-01

“电路分析”是高等工科院校必须开设的一门专业基础课程,它是学习其他专业课程的基础。它的教学环节包括理论课和实验课两部分,其特点是理论性强,课堂教学偏重于对电路理论的讲解及具体电路模型的分析,多有冗繁的数学计算推导,由于学生对教学内容缺乏感性认识,觉得枯燥无味。其次,在实验教学中,现有的电路实验装置大多是模块化设计,很大程度上限制了学生的思维能力和动手能力,往往只能选择性地开设一些实验项目,不能系统地完成所有的实验,降低了学生学习该课程的兴趣和积极性。引入 Multisim 仿真软件弥补了一些院校实验室硬件条件的不足,摆脱了完全依赖实验室的困境。硬件实验和软件实验相结合,在实验方法和内容上互为补充,从而提高教学质量。

Multisim 11 是美国国家仪器公司(NI National Instruments)于 2010 年 1 月推出的 Multisim 最新版本,是目前各种电路辅助设计和分析计算机软件中功能最完善、版本最新的一种。该软件可以将电路原理图的绘制、电路的测试分析和仿真结果等内容集成在一个电路窗口中。将 Multisim 引入电路分析教学中,利用其强大的仿真功能,对课程的重点、难点电路进行电路仿真,利用虚拟仪器仪表和仿真分析法可以得到电路的实验数据和响应曲线,大大加深了学生对基本概念的理解,极大地提高了学生的学习兴趣,达到了理论与实践相结合的目的。学生也可以用仿真软件进行电路仿真、电路设计,用虚拟仪器测量验证,拓宽知识面。

软件虽然功能强大,但不是有了它所有的实验就都可以通过仿真实验解决的,要培养学生的实际动手能力,必须到实验室动手做实验。

本书共 9 章,第 1 章、第 2 章由徐礼明编写,第 3 章、第 4 章由赵桂云编写,第 5 章、第 6 章由李娜编写,第 7 章、第 8 章由许燕萍编写,李冬冬编写第 9 章,李学明负责全书的组织和定稿。在编写过程中,作者参考了国内已经出版的有关 Multisim 仿真应用的相关书籍,借此机会向各位作者表示衷心的感谢。Multisim 软件功能强大,还有待继续探讨和挖掘。

全书所有的仿真实验实例可以在清华大学出版社网站上下载。

由于编著者水平有限,对 Multisim 软件的理解还不够深刻,书中难免有不妥和错误之处,请专家和读者批评指正。

作者

2014 年 8 月

第 1 章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路的基本物理量及其参考方向	1
1.1.1 电路的作用	1
1.1.2 电流及电流的参考方向	2
1.1.3 电压及电压的参考方向	3
1.1.4 电流和电压的关联参考方向	4
1.1.5 电路功率的测量和用电器的额定值	4
1.2 欧姆定律的仿真实验	7
1.2.1 欧姆定律的仿真实验过程	7
1.2.2 电源有载工作、开路与短路	9
1.2.3 电源外特性的仿真实验	10
1.3 基尔霍夫定律的验证	12
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)的验证	12
1.3.2 基尔霍夫电压定律的验证	13
1.3.3 电路中的电压和电位的仿真测量	14
1.4 电压源和电流源的仿真	16
1.4.1 电压源和实际电压源	16
1.4.2 理想电流源和实际电流源	18
1.4.3 实际电压源和实际电流源的串联、并联	22
1.5 受控源的仿真实验	24
1.5.1 电压控制电压源	25
1.5.2 电流控制电压源	25
1.5.3 电压控制电流源	26
1.5.4 电流控制电流源	27
练习题	28
第 2 章 直流电路的分析	31
2.1 电阻电路的等效变换	31
2.1.1 电阻的串联	31
2.1.2 电阻的并联	35
2.1.3 电阻的混联	36

2.2	电阻星形连接与三角形连接的等效互换	39
2.2.1	星形网络等效变换为三角形网络	39
2.2.2	三角形网络等效为星形网络	40
2.3	电压源与电流源的等效变换	40
2.3.1	电压源变换为电流源	41
2.3.2	电流源变换为电压源	41
2.3.3	有源电路的化简	42
2.4	支路电流法的仿真验证	43
2.5	网孔电流法的仿真验证	45
2.6	节点电压法的仿真验证	46
2.6.1	理论计算	46
2.6.2	仿真测量法	48
2.7	叠加定理和替代定理的仿真	48
2.7.1	叠加定理的验证	49
2.7.2	含受控源电路的叠加定理应用	49
2.7.3	齐次定理的验证	50
2.7.4	替代定理的验证	50
2.8	戴维南定理和诺顿定律的仿真验证	52
2.8.1	戴维南定理的验证	52
2.8.2	诺顿定理的仿真验证	54
2.9	最大功率传输定理的仿真	55
2.10	互易定理和特勒根定理的仿真	57
2.10.1	互易定理的验证	57
2.10.2	特勒根定理的仿真	58
	练习题	59
第3章	正弦电路的稳态分析	62
3.1	正弦交流电三要素的仿真	62
3.1.1	正弦交流电的三要素	62
3.1.2	相位差的测量	63
3.1.3	正弦交流电的有效值	64
3.2	正弦交流电路	65
3.2.1	纯电阻电路	65
3.2.2	纯电容电路	66
3.2.3	纯电感电路	68
3.3	RLC 串联电路	71
3.3.1	RC 串联电路	71
3.3.2	RL 串联电路	72

3.3.3	<i>RLC</i> 串联电路	73
3.4	<i>RLC</i> 并联电路	75
3.4.1	<i>RC</i> 并联电路	75
3.4.2	<i>RL</i> 并联电路	76
3.4.3	<i>RLC</i> 并联电路	78
3.5	交流电路的功率	79
3.5.1	<i>RLC</i> 并联电路的功率	79
3.5.2	功率因数的提高	80
3.5.3	正弦交流电路的最大功率传递定理	80
	练习题	84
第 4 章	谐振电路与互感	86
4.1	<i>RC</i> 电路的频率特性	86
4.1.1	一阶 <i>RC</i> 低通滤波电路	86
4.1.2	一阶 <i>RC</i> 高通滤波器	88
4.1.3	<i>RC</i> 带通滤波器	89
4.1.4	<i>RC</i> 移相电路	90
4.2	<i>RLC</i> 串联谐振电路	91
4.2.1	串联谐振电路的理论分析	92
4.2.2	串联谐振电路的仿真实验	93
4.3	并联谐振电路的仿真实验	99
4.3.1	并联谐振电路的理论分析	99
4.3.2	并联谐振电路的仿真分析	101
4.4	互感电路	106
4.4.1	自感现象的仿真实验	106
4.4.2	互感线圈同名端的判断	107
4.4.3	互感线圈互感系数 M 和耦合系数 K 的测量	110
4.4.4	理想变压器的仿真实验	111
	练习题	112
第 5 章	三相交流电路的仿真实验	114
5.1	对称三相电源	114
5.2	三相负载的连接	116
5.2.1	负载的星形连接	116
5.2.2	负载的三角形连接	118
5.3	三相电路的功率测量	120
5.3.1	三相四线制星形接法	120
5.3.2	三相三线制电路	120

5.4	三相交流电相序的测量	124
	练习题	126
第 6 章	非正弦周期电路的仿真分析	128
6.1	非正弦周期信号的傅里叶分析与合成	128
6.1.1	非正弦周期信号的傅里叶分析	128
6.1.2	非正弦周期信号的合成	142
6.2	非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	143
6.2.1	非正弦周期量的电压或电流的有效值	143
6.2.2	平均值	145
6.2.3	平均功率	145
6.3	非正弦周期电流电路的稳态分析	147
	练习题	149
第 7 章	线性动态电路的时域分析	151
7.1	换路定律的仿真	151
7.1.1	过渡过程	151
7.1.2	换路定律	153
7.1.3	电路初始值的确定	153
7.2	一阶电路的零状态响应	156
7.2.1	RC 电路的零状态响应	156
7.2.2	RL 电路的零状态响应	160
7.3	一阶电路的零输入响应	163
7.3.1	RC 电路的零输入响应	163
7.3.2	RL 电路的零输入响应	165
7.4	一阶电路的全响应	168
7.4.1	RC 电路的全响应	168
7.4.2	RL 电路的全响应	172
7.5	一阶电路全响应的三要素法	174
7.6	RC 电路在周期性矩形脉冲激励下的响应	177
7.6.1	RC 微分电路	177
7.6.2	RC 积分电路	179
7.7	一阶电路的阶跃响应和冲激响应	181
7.7.1	阶跃响应	181
7.7.2	一阶电路的冲激响应	182
7.8	二阶电路的响应	182
7.8.1	二阶电路的零输入响应	182
7.8.2	RLC 电路的零状态响应	188

7.8.3 RLC 电路的全响应	191
练习题	194
第 8 章 二端口网络参数的测量	196
8.1 二端口网络的参数	196
8.1.1 阻抗参数的测量	196
8.1.2 导纳参数的测量	199
8.1.3 传输参数的测量	201
8.1.4 混合参数的测量	202
8.2 二端口网络的连接	207
8.2.1 二端口网络的串联	208
8.2.2 二端口网络的并联	210
8.2.3 二端口网络的级联	212
8.3 负阻抗变换器和回转器	213
8.3.1 负阻抗变换器	213
8.3.2 回转器	218
练习题	221
第 9 章 NI Multisim 11 基本操作	223
9.1 仿真电路界面的设置	223
9.2 元器件库	228
9.2.1 电源库/信号源库	229
9.2.2 基本元件库	229
9.2.3 二极管库	229
9.2.4 晶体管库	229
9.2.5 模拟集成元件库	230
9.2.6 TTL 元件库	230
9.2.7 COMS 元件库	230
9.2.8 混杂数字器件库	230
9.2.9 混合器件库	230
9.2.10 指示器件库	230
9.2.11 电源器件库	231
9.2.12 其他元器件库	231
9.2.13 高级外设元器件库	231
9.2.14 射频器件库	231
9.2.15 机电器件库	232
9.2.16 NI 库	232
9.2.17 微控制器库	232

9.3	元器件操作	232
9.3.1	元器件的选用	232
9.3.2	元器件的放置	232
9.3.3	元器件的选中	233
9.3.4	元器件的复制、移动、删除	233
9.3.5	元器件的旋转与反转	233
9.3.6	设置元器件属性	234
9.3.7	设置元器件颜色	235
9.4	导线的连接	235
9.4.1	导线的连接、删除与改动	235
9.4.2	连接点的使用	236
9.4.3	总线的放置	236
9.5	添加文本	237
9.5.1	添加文本内容	237
9.5.2	添加电路描述窗	237
9.5.3	添加标题栏	237
9.5.4	保存电路文件	239
9.6	NI Multisim 11 虚拟仪器的使用	239
9.6.1	数字万用表	239
9.6.2	函数信号发生器	241
9.6.3	双通道示波器	244
9.6.4	四通道示波器	246
9.6.5	功率表	249
9.6.6	IV 分析仪	249
9.6.7	电流探针	251
9.6.8	测量探针	252
9.6.9	电压表和电流	257
9.6.10	失真分析仪	259
9.6.11	波特图示意	260
9.6.12	频率计	262
9.6.13	频谱分析仪	263
9.6.14	网络分析仪	267
9.7	常用仿真分析法	271
9.7.1	仿真分析步骤	271
9.7.2	直流工作点分析	274
9.7.3	交流分析	277
9.7.4	瞬态分析	280
9.7.5	傅里叶分析	284

9.7.6 单一频率交流分析.....	288
9.7.7 直流扫描分析.....	294
9.7.8 参数扫描分析.....	297
参考文献.....	301

电路的基本概念与基本定律

1.1 电路的基本物理量及其参考方向

1.1.1 电路的作用

电路的第一个作用是实现能量的传输和转换。如图 1-1 所示,220V 交流电将其他形式的能量转化为电能,白炽灯将电能转换为光能和热能,导线实现能量的传输,开关起控制作用。电路的另一个作用是传递和处理信号(如语言、音乐、文字、图像、温度等)。在这类电路中,虽然也存在能量的传输和转换,但能量数值较小,不是关注的重点,一般关注的是信号传输的质量,如要求信号不失真、准确、快速传递等。图 1-2 是一个信号处理电路,方波信号经过微分电路后输出为正、负尖脉冲信号。

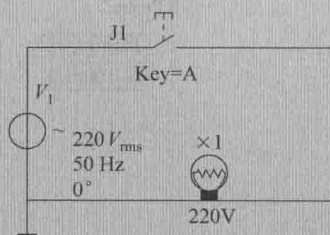


图 1-1 白炽灯电路

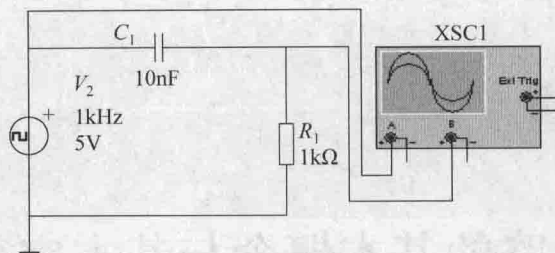


图 1-2 微分电路

这类电路中,起电源作用的常称为信号源,又称激励,经传输与处理后的输出信号称为响应。

1.1.2 电流及电流的参考方向

电流的实际方向(即真实方向)规定为正电荷运动的方向。在一些简单电路中,电流的实际方向是显而易见的,在电源外部,电流的实际方向是从电源正极流出,经过用电器(或称负载)后,再从负极流入;在电源内部,电流从负极经内部电路流向正极,构成一个闭合的路径。如果电路中只有一个电源(电压源或电流源),电流的实际方向很容易确定。但是在比较复杂的电路中,要在电路中凭感觉确定某一条电路上电流的实际方向,显然是比较困难的。例如在如图 1-3 所示的电路中,有三条支路,凭想象来确定每条支路上电流的实际方向,可能猜对了、也可能猜错了。正确的方法是,在每一条支路上首先设置电流的参考方向,按照这个参考方向将“测量探针”或电流表接入电路,如果测量出来的数值为“+”,就表明电流的实际方向和图中的参考方向一致;如果测量出来的数值为“-”,就说明电流的实际方向和图中的参考方向相反。图 1-3 用放置“测量探针”的方法判断电流的实际方向,如果“测量探针”显示电流为正值,说明电流的实际方向和“测量探针”方向一致,如果“测量探针”显示电流为负值,就说明电流的实际方向和“测量探针”方向相反。这样既测量了电流大小,也判断出了电流的实际方向。图 1-4 则是用数字电流表进行测量和判断的。在进行电路分析时,在没有事先确定电流参考方向的情况下,电流的正负号是毫无意义的。

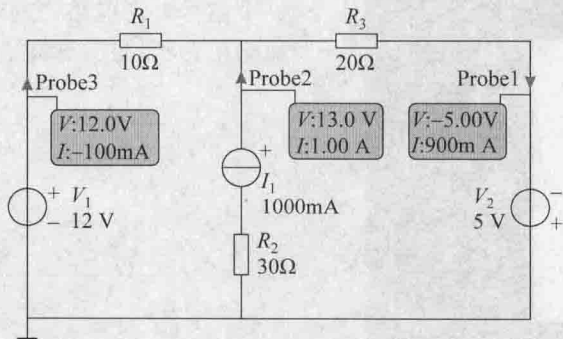


图 1-3 电流实际方向的确定

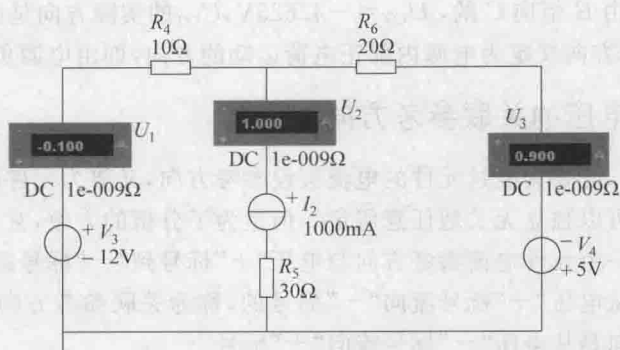


图 1-4 电流实际方向的确定

1.1.3 电压及电压的参考方向

在电路中,电流总是从高电位点流向低电位点的,习惯上把电位降低的方向(即正电荷运动的方向)作为电压的实际方向。在外电路中,电流总是从高电位点流向低电位点的,电压的实际方向是从高电位指向低电位的,电压的数值等于电路中两点之间的电位之差。和电流一样,在复杂的电路中不能凭感觉确定任意两点之间电压的真实方向,同样要事先选定电压的参考方向。为了确定电路中任意两点电压的实际方向,可以用数字电压表接入被测电路的两端,测量时电压表的“+”接线柱要和假设的高电位点连接,“-”接线柱要和假设的低电位点连接。

在图 1-5 中,求出电压 U_{AB} 、 U_{BC} 和 U_{CO} 的实际方向,电压的参考方向采用双下标表示,即已经确定了电压的参考方向,所以测量时数字电压表的“+”接线柱要和假设的高电位点连接,“-”接线柱要和低电位点连接。如果数字电压表读数为正值,就表示电压的实际方向和参考方向一致;如果数字电压表读数为负值,就表示电压的实际方向和参考方向相反。测量结果 $U_{AB}=1.475\text{V}$,说明 U_{AB} 的实际方向是由 A 指向 B 的, $U_{BC}=7.932\text{V}$,

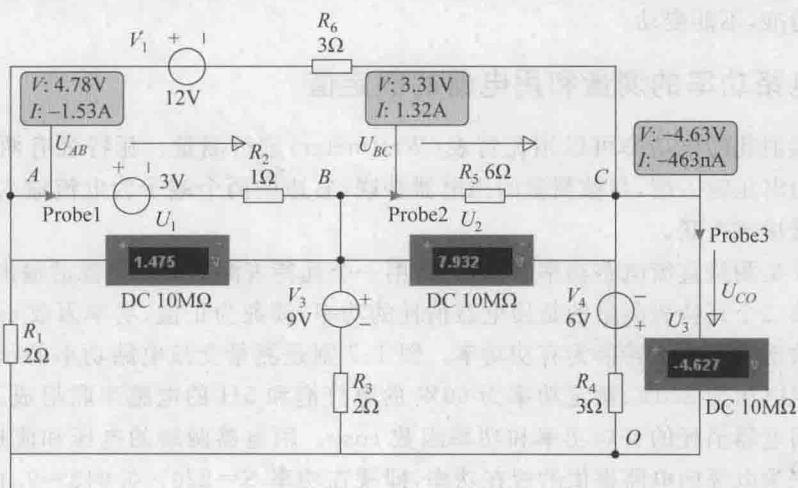


图 1-5 电压实际方向的判断

U_{BC} 的实际方向是由 B 指向 C 的, $U_{CO} = -4.625\text{V}$, U_{CO} 的实际方向是由 O 指向 C 的。

电动势的实际方向规定为电源内部正电荷运动的方向, 即由电源负极指向正极。

1.1.4 电流和电压的关联参考方向

在分析电路时, 既要为流过元件的电流假设参考方向, 又要为元件两端的电压假设参考方向, 它们彼此可以独立无关地任意假定。但是为了分析的方便, 常常选择两者为同一个参考方向, 即同一个元件电流参考方向与电压“+”标号到“-”标号的方向一致, 也就是说, 电流的方向是从电压“+”标号流向“-”标号的, 称为关联参考方向; 反之为非关联参考方向, 电流的方向是从电压“-”标号流向“+”标号。

人们常常习惯采用关联参考方向, 这样选取有许多方便之处。本书约定, 当在一个电路的各部分只标注电流参考方向或只标注电压参考方向时, 隐含着对这两个电路变量取的是关联参考方向。凡是一眼就能看出电流实际方向的, 就设关联参考方向和实际方向一致。对于复杂电路, 不易看出电流实际方向的, 只要在电路上任意设定一个方向作为关联参考方向即可。习惯上, 对于无源元件(如电阻、电感、电容等), 通常取它们的电压、电流为关联参考方向; 而对于电源(如电池、发电机等), 通常取它们的电压、电流为非关联参考方向。

例如在如图 1-5 所示的电路中, 我们假定 AB 这条支路上的关联参考方向由 A 指向 B , “电流探针”按图中的方式连接, 仿真结果, 显示电流为 -1.53A , 说明这条支路上电流的实际方向是从 B 点流向 A 点的, 电压表读数为正值, 说明 A 点电位高于 B 点电位, U_{AB} 的实际方向是由 A 指向 B 的。 BC 这条支路上, 电流和电压均为正值, 实际方向和参考方向相同。 CO 支路上电流和电压均为负值, 它们的实际方向和参考方向相反, 即由 O 点指向 C 点。

电流、电压的实际方向是客观存在的, 但在复杂电路中, 一般难以判断它们的实际方向。参考方向是人为规定的电流、电压数值为正的方向。在分析问题时需要先规定参考方向, 然后根据规定的参考方向列写方程。参考方向一经规定, 在整个分析计算过程中就必须以此为准, 不能变动。

1.1.5 电路功率的测量和用电器的额定值

用电器消耗的电功率可以用瓦特表(Wattmeter)进行测量。瓦特表有两组端子, 左边的端子为电压输入端, 与被测量的用电器并联, 右边的两个端子为电流输入端, 与被测量的用电器接成串联。

图 1-6 是测量直流电路功率的示意图, 第一个瓦特表测量的是电源的输出功率, 读数为负值。第二个瓦特表测量的是用电器消耗的功率, 读数为正值, 功率因数 $\cos\varphi$ 等于 1, 即电源的输出功率完全转换为有功功率。图 1-7 则是测量交流电路功率的示意图, 交流负载由额定电压为 220V 、额定功率为 60W 的电灯泡和 5H 的电感串联组成。瓦特表上显示的是用电器消耗的有功功率和功率因数 $\cos\varphi$ 。用电器两端的电压和流过用电器的电流的乘积为电源向电路提供的视在功率, 即视在功率 $S = 220 \times 0.043 = 9.46(\text{VA})$, 有功功率 $P = 9.046\text{W}$, 功率因数 $\cos\varphi = P/S = 9.046/9.46 \approx 0.956$ 。瓦特表上显示的 $\cos\varphi$ 为

0.951,两者很接近。因为负载是感性的,故电源的视在功率一部分转换为有功功率,还有一部分转换为无功功率。

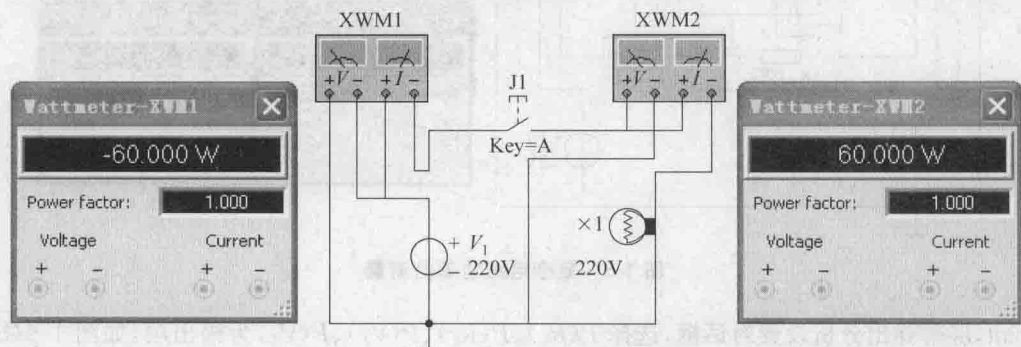


图 1-6 直流电路功率的测量

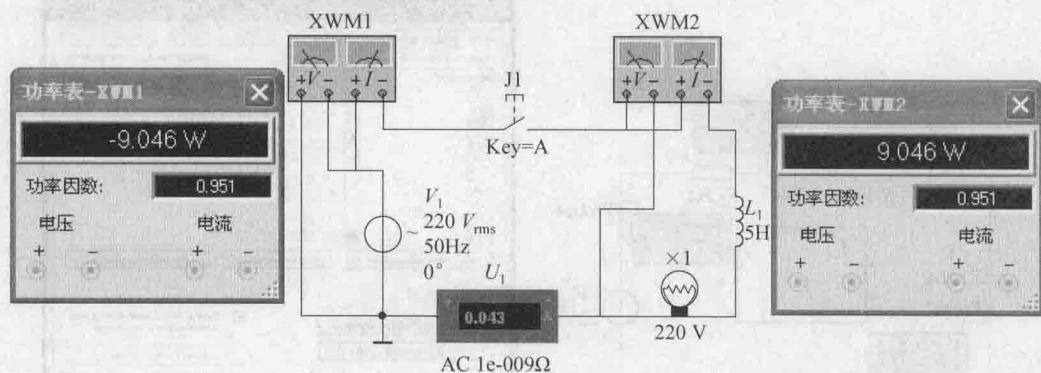


图 1-7 交流电路功率的测量

功率在电路分析中是十分重要的,电功率与电压、电流密切相关。在如图 1-8 所示的电路中有两个直流电源接成反串联,下面我们用瓦特表分别测量各个器件的消耗的功率。对于电源,因为它的电动势方向是从负极指向正极,所以瓦特表上电压表的“+”接线柱连接电源的负极,电压表的“-”接线柱则连接电源的正极;瓦特表上电流表的连接是按照电流的实际方向串入电路中的。电阻上的电压和电流方向一致(关联参考方向),按实际方向分别连接。仿真结果,两个电源,一个功率表显示为负值,表示向外输出电功率,而另一个功率表为正值,表明它从电路中吸收功率,此时电源 V_2 作为负载被充电。两个电阻的功率为正,表明它们是消耗电能的。 $-5.333+2.844+1.422+1.067=0$ 。

对于一个完整的电路而言,它吸收的功率与产生的功率总是相等的。即在任一时刻,电路中总功率的代数和均为零,这称为功率平衡。它体现了电路能量守恒原理。

对于如图 1-8 所示的电路,还可以用“直流工作点分析”法对图中各元器件的功率进行分析,分析电路如图 1-9(a)所示。执行菜单命令 Simulate→Analysis→DC Operation

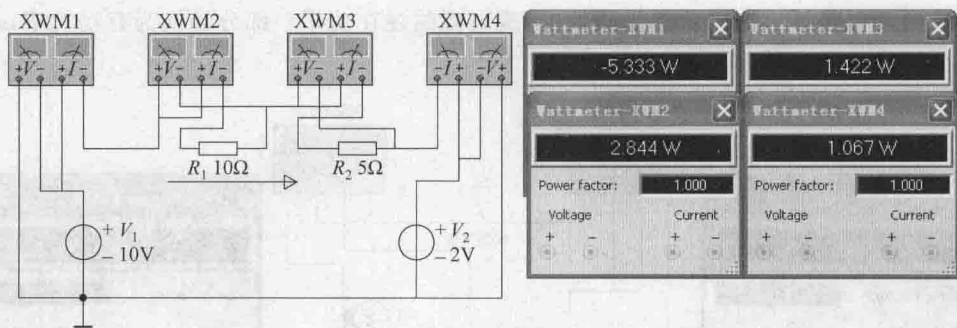
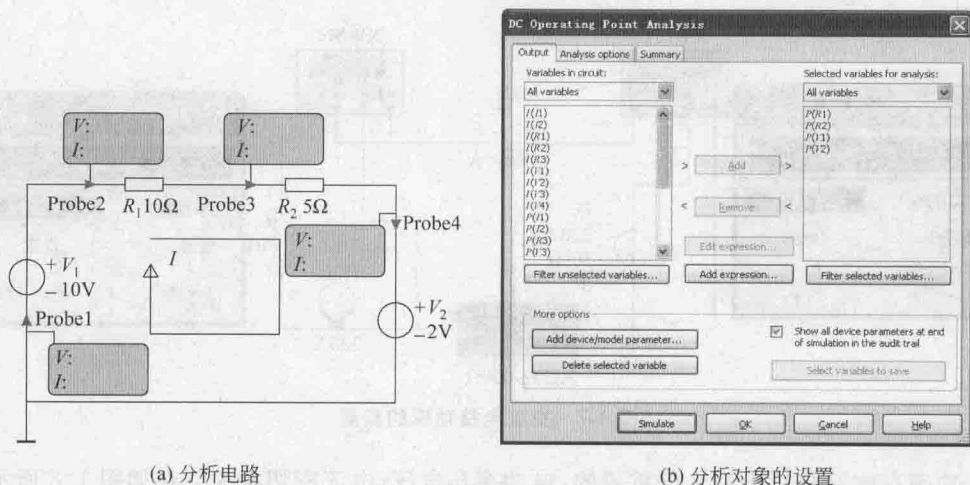


图 1-8 复杂电路功率的测量

Point, 屏幕弹出分析设置对话框, 选择 $P(R_1)$ 、 $P(R_2)$ 、 $P(V_1)$ 、 $P(V_2)$ 为输出项, 如图 1-9(b) 所示。然后单击对话框左下角的 Simulate 按钮, 系统会自动把每个元器件的功率显示出来, 如图 1-9(c) 所示, 其结果和虚拟瓦特表测量的数据完全一样。



(a) 分析电路

(b) 分析对象的设置

DC Operating Point	
1	P(V1) -5.333 33
2	P(R2) 1.066 67
3	P(R1) 2.844 44
4	P(R2) 1.422 22

(c) 分析结果

图 1-9 用直流工作点分析法测量功率

【案例 1】 对于某些含有电压源、电流源的复杂电路, 各个元器件的功率计算一般来说是比较烦琐的, 采用“直流工作点分析”法无疑是比较快捷的, 下面通过图 1-10(a) 进行仿真分析, 图中的两个电流源、两个电压源和一个电阻的功率作为分析对象(分析对象的