

策划编辑 高小红
责任编辑 唐宁
封面设计 

新时代高等教育创新型教材
“互联网+”教育改革立体化教材

电工技能 与实训教程

电工技能
与实训教程

电工技能 与实训教程

赵春红 陈圣涛 欧星◎主编

赵春红 陈圣涛 欧星◎主编

 电子科技大学出版社



定价: 49.80元

 电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

新时代高等教育创新型教材
“互联网+”教育改革立体化教材

电工技能 与实训教程

赵春红 陈圣涛 欧 星◎主编



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电工技能与实训教程 / 赵春红, 陈圣涛, 欧星主编.
成都: 成都电子科大出版社, 2025. 12. -- ISBN 978-7-
5770-2059-4

I. TM

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20259QF781 号

电工技能与实训教程

DIANGONG JINENG YU SHIXUN JIAOCHENG

赵春红 陈圣涛 欧星 主编

策划编辑 高小红
责任编辑 唐宁
责任校对 饶定飞
责任印制 梁硕

出版发行 电子科技大学出版社
成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 湖北鄂南新华印刷包装股份有限公司

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 14

字 数 335 千字

版 次 2025 年 12 月第 1 版

印 次 2025 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-2059-4

定 价 49.80 元

版权所有, 侵权必究

项目一 安全用电与触电急救	1
任务 1 安全文明用电常识	2
任务 2 触电急救	14
任务 3 电气消防知识	19
项目二 常用电工工具及材料的使用	25
任务 1 常用电工工具的使用	26
任务 2 常用导电材料	33
任务 3 常用绝缘材料	36
任务 4 常用磁性材料	38
项目三 常用电工仪器仪表的使用	40
任务 1 万用表的使用	41
任务 2 兆欧表的使用	49
任务 3 接地电阻测试仪的使用	57
任务 4 钳形电流表的使用	63
项目四 基本电路理论的验证	67
任务 1 电位与电压的测量	68
任务 2 基尔霍夫定律的验证	72
任务 3 叠加定理的验证	78
任务 4 戴维南定理的验证	84

项目五 电工基本操作工艺	92
任务 1 常用导线的连接	93
任务 2 常用焊接工艺	100
任务 3 电气设备的紧固件	109
项目六 家用电路的安装	114
任务 1 家用电路的电气元件	115
任务 2 单相电度表安装	124
任务 3 一居室电路的安装与检查	126
项目七 三相异步电动机	136
任务 1 三相异步电动机的结构、工作原理与铭牌	137
任务 2 三相异步电动机的拆卸与组装	144
任务 3 三相异步电动机的检测	154
项目八 三相异步电动机的控制	160
任务 1 电气控制线路装配工艺和规范	161
任务 2 三相异步电动机的点动、长动控制	173
任务 3 三相异步电动机的正反转控制	194
任务 4 三相异步电动机的 Y- Δ 降压起动	206
参考文献	214

项目四

基本电路理论的验证

在电子工程领域，基本电路理论是理解和分析复杂电路的基础。通过验证这些理论，可以加深对电路行为的理解，并为实际应用提供理论支持。本项目旨在通过实验手段，使用电位与电压测量验证基尔霍夫定律、叠加定理和戴维南定理等基本电路理论。通过四个任务的实践操作，将能够直观地观察和验证这些理论在实际电路中的应用，并掌握电路分析的基本方法和技能。同时，实验过程将帮助电工培养严谨的科学态度和实践能力，为进一步学习高级电路分析和电气工程应用奠定坚实的基础。

学习目标

通过本项目学习，掌握电位与电压测量方法，验证基尔霍夫定律、叠加定理和戴维南定理。学会运用基本电路理论分析实际电路，提升电路分析与实践能力，培养科学思维和实践技能，为深入学习电气工程知识和解决实际问题奠定基础。

任务 1 电位与电压的测量

任务描述

电位与电压是电路分析中的两个核心概念，是理解电路行为的基础。电位是指电路中某点相对于参考点的电势差，而电压则是两点之间的电势差。本任务将通过实验操作，掌握电位和电压的测量方法。使用万用表作为测量工具，通过搭建简单的电路，测量不同节点的电位和两点之间的电压。本任务将详细介绍如何正确选择参考点、如何连接万用表以及如何读取测量数据。同时，还通过实际测量结果，解释电位和电压之间的关系，加深对电路基本概念的理解。完成本任务的学习，电工技术人员将能够准确测量电路中的电位和电压，并为后续电路分析任务奠定坚实基础。

相关知识

一、电位与电压的基本概念

1. 电位

1) 定义

电位是指某一点相对于参考点的电势差。在电路中，电位是一个相对量，必须选择一个参考点（通常称为“地”或“零电位点”）。电位的单位是伏特（V）。

2) 参考点的选择

选择参考点是测量电位的前提。通常，参考点可以是电路中的某个固定节点，如电源的负极、大地等。在不同的电路中，参考点的选择可能不同，但一旦选定，电路中其他各点的电位都是相对于该参考点而言的。电位参考选择示例如图 4-1 所示。

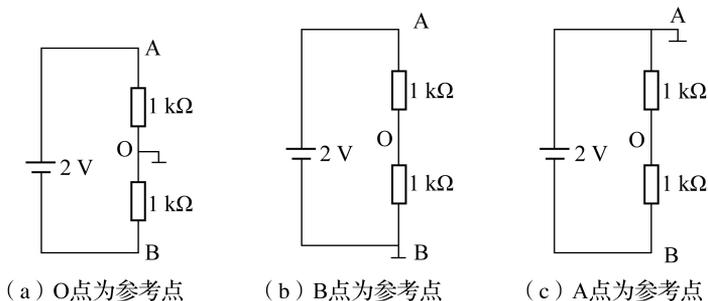


图 4-1 电位参考点选择示例

如图 4-1 (a) 所示的电路中, 先取 O 点为参考点, 认定参考点的电位 $U_0 = 0$, 比该点高的电位为正, 比该点低的电位为负。则 A 点的电位为正, B 点的电位为负。即

$$I = \frac{2}{1+1} = 1 \text{ mA}$$

$$U_A = U_A - U_0 = U_{A0} = 1 \times 1 = 1 \text{ V}$$

$$U_B = U_B - U_0 = U_{B0} = -1 \times 1 = -1 \text{ V}$$

3) 电位的意义

电位反映了电路中某一点的电势高低。它在电路分析中非常重要, 例如, 在分析电路中的电压分配、计算电能传输等问题时, 都需要考虑电位。

2. 电压

1) 定义

电压是指电路中两点之间的电势差。它是电场力将单位正电荷从一点移动到另一点所做的功, 单位是伏特 (V)。电压是衡量电能传输和转换的重要物理量。

2) 电压的表示

电压可以用符号 U 或 V 表示, 通常用 U_{AB} 表示点 A 和点 B 之间的电压, 其中 $U_{AB} = U_A - U_B$ 。如果 U_{AB} 为正, 则说明点 A 的电位高于点 B; 如果 U_{AB} 为负, 则说明点 B 的电位高于点 A。

如图 4-1 (a) 所示的电路中, 点 A 和点 B 之间的电压为

$$U_{AB} = U_A - U_B = 2 \text{ V}$$

$$U_{BA} = U_B - U_A = -2 \text{ V}$$

3) 电压的来源

电压可以由电源 (如电池、发电机等) 提供, 也可以由电荷的分布 (如静电场) 产生。在电路中, 电压是推动电流流动的动力。

二、电位的测量

1. 测量原理

1) 电压表法

电位的测量通常通过电压表来实现。将电压表的一端连接到待测点, 另一端连接到参考点, 电压表的读数即为该点相对于参考点的电位。

2) 示波器法

在测量高频信号或动态电位时, 可以使用示波器。将示波器的探头连接到待测点和参考点, 示波器的屏幕显示信号的波形, 通过读取波形的幅度可以得到电位的大小。

2. 测量步骤

1) 选择参考点

在测量之前, 必须明确参考点的位置。通常选择电源的负极或大地作为参考点。

2) 连接测量仪器

将电压表或示波器的探头连接到待测点和参考点。确保连接正确，避免短路或接触不良。

3) 读取测量结果

读取电压表或示波器的读数，该读数即待测点相对于参考点的电位。

3. 注意事项

1) 电压表内阻

电压表的内阻应尽可能大，以减少对电路的影响。小内阻的电压表可能会改变电路的工作状态，导致测量结果不准确。

2) 参考点一致性

在测量多个点的电位时，必须保持参考点的一致性。否则，测量结果将失去意义。

3) 安全操作

在测量高电压电路时，必须采取安全措施，避免触电危险。使用绝缘工具，并确保测量仪器的绝缘性能良好。

三、电压的测量

1. 测量原理

1) 电压表法

电压表法是最常用的电压测量方法。将电压表并联在被测电路的两端，电压表的读数即被测电压。

2) 万用法

万用表是一种多功能测量仪器，可以测量电压、电流和电阻等多种物理量。将万用表设置到电压测量挡位，并联在被测电路的两端，读取万用表的读数即可得到被测电压。

3) 示波器法

在测量高频电压或动态电压时，可以使用示波器。将示波器的探头连接到被测电路的两端，示波器的屏幕显示信号的波形，通过读取波形的幅度可以得到电压的大小。

2. 测量步骤

1) 选择量程

根据被测电压的大小选择合适的量程。如果量程选择过大，测量精度就会降低；如果量程选择过小，则可能会损坏测量仪器。

2) 连接测量仪器

将电压表、万用表或示波器的探头并联在被测电路的两端。确保连接正确，避免短路或接触不良。

3) 读取测量结果

读取测量仪器的读数，该读数即被测电压的大小。

3. 注意事项

1) 电压表内阻

电压表的内阻应尽可能大，以减少对电路的影响。小内阻的电压表可能会改变电路的工作状态，导致测量结果不准确。

2) 量程选择

选择合适的量程是确保测量精度的关键。如果被测电压较大，则应选择较大的量程；如果被测电压较小，则应选择较小的量程。

3) 安全操作

在测量高电压电路时，必须采取安全措施，避免触电危险。使用绝缘工具，并确保测量仪器的绝缘性能良好。

4) 频率范围

在测量高频电压时，需要注意测量仪器的频率响应范围。如果测量仪器的频率响应范围不够宽，则可能会导致测量结果不准确。

任务实施

如图 4-2 所示的电路中，电源 U_{S1} 用恒压源 I 路 $0 \sim +30 \text{ V}$ 可调电源输出端，并将输出电压调到 $+6 \text{ V}$ ， U_{S2} 用 II 路 $0 \sim +30 \text{ V}$ 可调电源输出端，并将输出电压调到 $+12 \text{ V}$ 。开关 S_1 、 S_2 均朝上打，接入电源 U_{S1} 和 U_{S2} ， S_3 朝上打，接入电阻 R_3 。

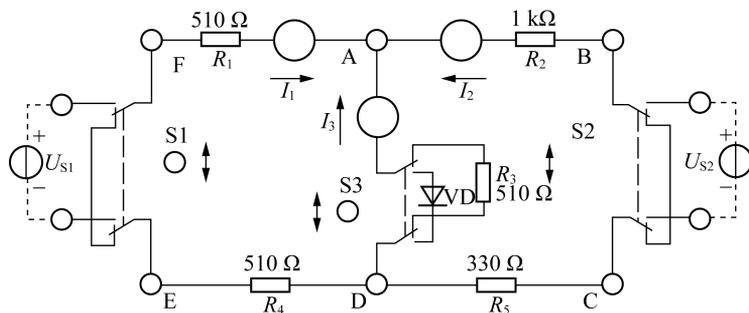


图 4-2 任务 1 任务实施电路

一、测量电路中各点电位

以图 4-2 中的 A 点作为电位参考点，分别测量 B、C、D、E、F 各点的电位。

用电压表的负端（黑色接线柱）与 A 点相连，正端（红色接线柱）分别对 B、C、D、E、F 各点进行测量，数据记入表 4-1 中。以 D 点作为电位参考点，重复上述步骤，测得数据记入表 4-1 中。

二、测量电路中相邻两点之间的电压值

在图 4-2 中，测量电压 U_{AB} ：将电压表的正端（红色接线柱）与 A 点相连，负端（黑色接线柱）与 B 点相连，读电压表读数，记入表 4-1 中。

按同样方法测量 U_{BC} 、 U_{CD} 、 U_{DE} 、 U_{EF} 及 U_{FA} ，测量数据记入表 4-1 中。

表 4-1 电路中各点电位和电压数据

单位：V

电位参考点	V_A	V_B	V_C	V_D	V_E	V_F	U_{AB}	U_{BC}	U_{CD}	U_{DE}	U_{EF}	U_{FA}
A	0											
D				0								

通过对电位测量结果值进行计算，验证电压测量值。

三、操作注意事项

(1) 实验电路中使用的电源 U_{S1} 和 U_{S2} 用 0~+30 V 可调电源输出端，应分别将输出电压调到 +6 V 和 +12 V 后，再接入电路中，并防止电源输出端短路。

(2) 在使用数字式直流电压表测量电位时，用黑笔端插入参考电位点，红笔端插入被测各点，若显示正值，则表明该点电位为正（即该点电位高于参考点电位）；若显示负值，则表明该点电位为负（即该点电位低于参考点电位）。

(3) 在使用数字式直流电压表测量电压时，红笔端插入被测电压参考方向的正端（+），黑笔端插入被测电压参考方向的负端（-），若显示正值，则表明电压参考方向与实际方向一致；若显示负值，则表明电压参考方向与实际方向相反。

任务 2 基尔霍夫定律的验证

任务描述

在电路分析中，电路的每一个元件既有电压又有电流，每个元件都有自己的电压和电流的约束关系。对于简单电路（凡用串、并联的方法能够将电路最终化简为单一回路的电路），可以用欧姆定律来求解。从 20 世纪初，电子技术发展十分迅速，电路变得越来越复杂。某些电路呈现出网络形状，并且网络中还存在着一些由 3 条或 3 条以上支路形成的交点。这种复杂电路不是串、并联电路的基本理论所能描述的。基尔霍夫定律由基尔霍夫首先提出，是计算多回路电路问题的两个定律。该定律能够迅速地求解复杂电路，从而成功地解决了复杂电路阻碍电子技术发展的难题。

本任务将学习求解复杂电路的基本定律——基尔霍夫定律，并对其进行实验验证。

相 关 知 识

一、基尔霍夫定律基本术语

基尔霍夫定律是电路的基本定律。在讨论该定律之前，就图 4-3 所示电路介绍几个基本术语。

(1) 支路。电路中的每一个分支称为支路。支路中的元件流过同一电流。含有电源的支路称为有源支路，不含有电源的支路称为无源支路。在图 4-3 中有 acb、ab、adb 三条支路。其中，adb 为无源支路，acb、ab 为有源支路。

(2) 节点。三个或三个以上支路的连接点称为节点。在图 4-3 中共有两个节点，即 a 点和 b 点。

(3) 回路。电路中任一闭合路径称为回路。在图 4-3 中有 acba、abda、acbda 三个回路。

(4) 网孔。未被其他支路分割的单孔回路称为网孔。在图 4-3 中有 acba、abda 两个网孔。

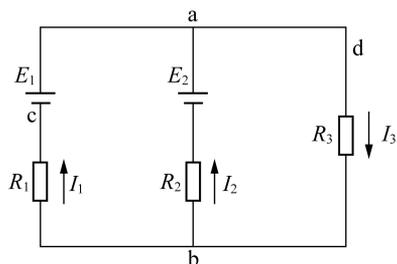


图 4-3 电路结构举例

二、基尔霍夫第一定律 (KCL)

基尔霍夫第一定律是表明某一节点处各支路电流之间的关系，所以又称为“基尔霍夫电流定律”。它指出：流入任意一个节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

在图 4-3 所示电路中，对节点 a 可写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (4-1)$$

基尔霍夫电流定律的根据是电流的连续性原则：电路中任意点（包括节点在内）均不能堆积电荷，所以流入节点的电流必等于流出节点的电流。

把式 (4-1) 改写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

可见，如果将流入节点的电流取正号，流出节点的电流取负号，基尔霍夫电流定律又可表示为：流入节点的电流的代数和等于零，即

$$\sum I = 0 \quad (4-2)$$

节点电流规律不仅适用于电路中的任意节点，而且还可以推广应用于任意假定的闭合面。即通过任一闭合面的电流的代数和也等于零。例如，根据图 4-4，可得

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

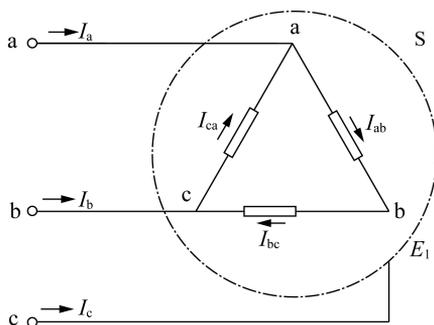


图 4-4 基尔霍夫电流定律的推广

以上三式相加，可得

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

即，对于假想的闭合面 S ， $\sum I = 0$ 。

三、基尔霍夫第二定律 (KVL)

基尔霍夫第二定律是表明任一回路内各部分电压之间的相互关系，所以又称为“基尔霍夫电压定律”。它指出：对于电路的任意一回路，沿着任一方向绕行一周，各元件电压的代数和等于零，即

$$\sum U = 0 \quad (4-3)$$

应用基尔霍夫电压定律时，首先应选定回路的绕行方向，如果回路中元件电压方向与绕行方向相同时取正号，反之，则取负号。

在如图 4-5 所示的回路（即如图 4-3 所示电路左面的一个回路）中，绕行回路的方向如图中虚线箭头所示，按图中所指定的各段电压的正方向，式 (4-3) 可写为

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0 \quad (4-4)$$

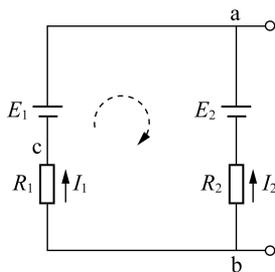


图 4-5 基尔霍夫电压定律

按如图 4-5 所示的参考方向，有 $U_{ab} = E_2 - R_2 I_2$ ， $U_{bc} = R_1 I_1$ ， $U_{ca} = -E_1$ ，将它们代入式 (4-4)，经整理后得

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 - E_2 \quad (4-5)$$

或

$$\sum (RI) = \sum E \quad (4-6)$$

因此，基尔霍夫电压定律也可以表示为：在任意回路中，电阻上电压降的代数和等于电动势的代数和。其中，电流的正方向与回路绕行方向一致的，则该电流在电阻上所产生的电压降取正号，相反则取负号；凡是电动势的正方向与回路绕行方向一致的，取正号，相反则取负号。这一结论不仅适用于直流电压，对任意波形的交流电压来说，上述结论在任一瞬间也适用。

基尔霍夫电压定律的根据是电位的单值性原理：当参考点选定后，电路中任意点的电位就只有一个数值，即从电路中任一点出发绕行电路一周，其间所有电位升的总和等于所有电位降的总和。关于电位的单值性与基尔霍夫第二定律的关系将在下一任务中进行研究。

【例 4-1】 图 4-6 中，已知 $I_1=1\text{ A}$ ， $I_2=2\text{ A}$ ， $I_3=-3\text{ A}$ ， $I_4=4\text{ A}$ ，求 I_5 。

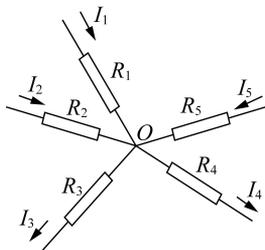


图 4-6 例 4-1 图

解：

$$I_5 = I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = (-3) + 4 - 1 - 2 = -2\text{ A}$$

I_5 为负值，说明它的实际方向与图中所假设的参考方向相反。

【例 4-2】 图 4-7 是某复杂电路中的一个闭合回路，已知： $U_1=4\text{ V}$ ， $U_3=3\text{ V}$ ， $U_4=-9\text{ V}$ （图中方块表示任意元件）。试求：(1) U_2 ；(2) U_5 。

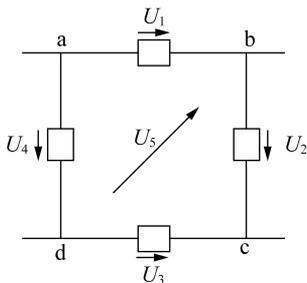


图 4-7 例 4-2 图

解：(1) 由 a 出发，顺时针方向绕行一周，根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_1 + U_2 - U_3 - U_4 = 0$$

则

$$U_2 = U_3 + U_4 - U_1 = 3 + (-9) - 4 = -10 \text{ V}$$

U_2 为负值，说明它的实际极性与图中所假设的极性相反。

(2) abda 虽然不是闭合回路，也可以应用基尔霍夫电压定律列出

$$U_1 - U_5 - U_4 = 0$$

则

$$U_5 = U_1 - U_4 = 4 - (-9) = 13 \text{ V}$$

如果沿着 bcd b 路径可得

$$U_2 - U_3 + U_5 = 0$$

则

$$U_5 = U_3 - U_2 = 3 - (-10) = 13 \text{ V}$$

可见，沿两条路径计算的结果是一样的。

任务实施

用 Multisim10 软件验证基尔霍夫定律。基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的验证方法类似，不同之处在于测量电流时，仪表串联；测量电压时，仪表并联。验证电压时，注意电压正负极性。下面以基尔霍夫电流定律的验证为例，进行详细介绍。

一、画电路图

运用 Multisim10 软件绘制如图 4-8 所示电路图。

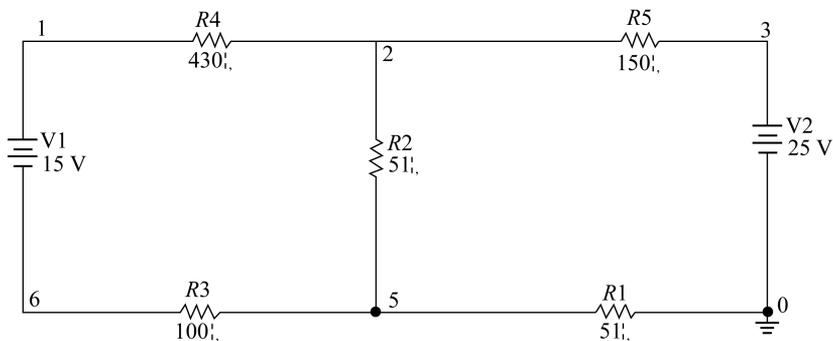


图 4-8 验证基尔霍夫定律电路

二、测量支路电流

运用 Multisim10 软件中的测试仪表分别测试如图 4-8 所示电路中节点 2 相连的三条支路的电流，如图 4-9、图 4-10、图 4-11 所示。

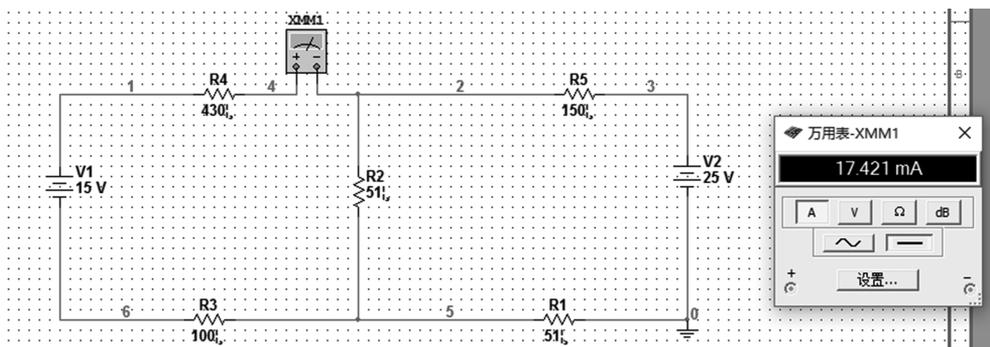


图 4-9 电流测试电路 1

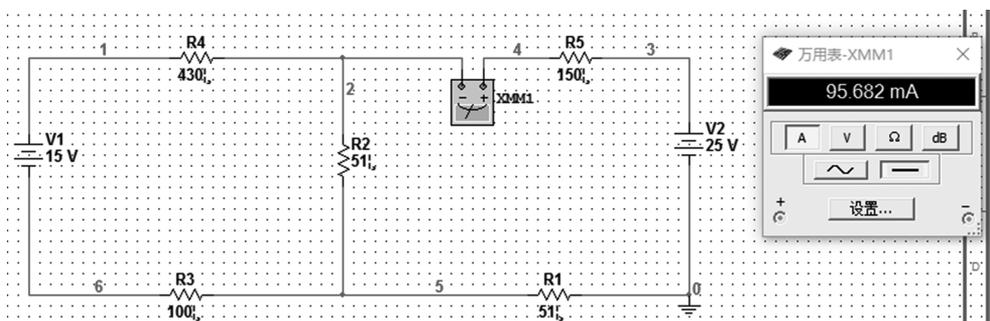


图 4-10 电流测试电路 2

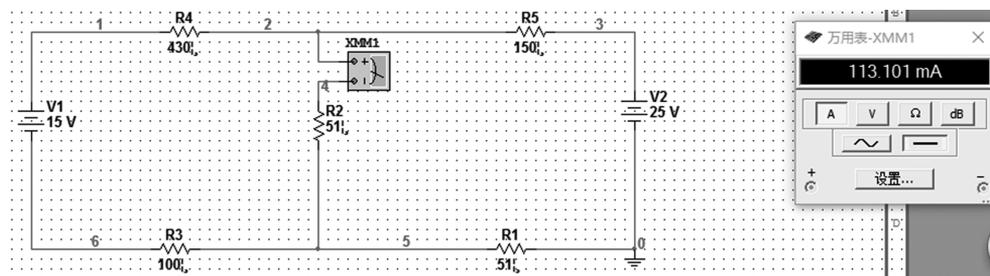


图 4-11 电流测试电路 3

三、测试结果分析

- (1) 假设经过 R_4 的电流为 I_1 ，经过 R_5 的电流为 I_2 ，经过 R_2 的电流为 I_3 。
- (2) 测量结果： $I_1 = 17.421 \text{ mA}$ ； $I_2 = 95.682 \text{ mA}$ ； $I_3 = 113.101 \text{ mA}$ 。
- (3) 分析： $I_1 + I_2 = 17.421 \text{ mA} + 95.682 \text{ mA} = 113.103 \text{ mA} \approx I_3$ ，基尔霍夫电流定律验证完成。

任务3 叠加定理的验证

任务描述

在线性电路中，有多个电源同时作用时，如图 4-12 所示，在电路任一支路产生的电流或在任意两点间产生的电压降，等于这些电源分别单独作用时，在该部分所产生的电流或电压降的代数和。这就是电路的叠加定理。

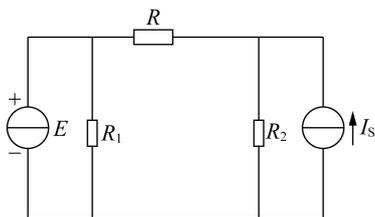


图 4-12 多路电源同时作用的电路

本任务学习和应用叠加定理求解复杂电路的方法，并对叠加定理进行仿真验证。

相关知识

一、叠加定理的定义

叠加定理是线性电路分析中的一个重要定理，它指出：在一个包含多个独立电源的线性电路中，任何一个支路的电流（或电压）等于各个独立电源单独作用时在该支路产生的电流（或电压）的代数和。其数学表达式为

$$I = I_{\text{源}1} + I_{\text{源}2} + \cdots + I_{\text{源}n} \quad \text{或} \quad U = U_{\text{源}1} + U_{\text{源}2} + \cdots + U_{\text{源}n}$$

其中， I 和 U 分别表示支路中的电流和电压； $I_{\text{源}i}$ 和 $U_{\text{源}i}$ 分别表示第 i 个独立电源单独作用时在该支路产生的电流和电压。

二、叠加定理的应用条件

1. 线性电路

叠加定理仅适用于线性电路，即电路中的元件（如电阻、电感、电容等）均为线性元件。线性元件的特性可以用线性方程描述，满足齐次性和叠加性。

2. 独立电源

电路中的电源必须是独立电源，即电源的输出电压或电流不随其他电路元件的变化而

变化。独立电源可以是电压源或电流源。

三、叠加定理及其应用

在如图 4-13 (a) 所示的电路中有两个电源 E_1 和 E_2 ，图 4-13 (b) 是该电路只有 E_1 作用时的分解电路，图 4-13 (c) 是该电路只有 E_2 作用时的分解电路。

叠加定理可证明如下：以图 4-13 (a) 中支路电流 I_1 为例，它可由支路电流法联立求解得

$$I_1 = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_1 - \left(\frac{R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_2$$

设

$$I'_1 = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_1$$

$$I''_1 = \left(\frac{R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \right) E_2$$

则

$$I_1 = I'_1 - I''_1$$

显然， I'_1 是当电路在 E_1 单独作用时，在第一支路中所产生的电流，如图 4-13 (b) 所示， I''_1 是当电路在 E_2 单独作用时，在第一支路中所产生的电流，如图 4-13 (c) 所示。因为 I''_1 的方向与 I_1 的正方向相反，所以带负号。

同理

$$I_2 = I'_2 - I''_2$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3$$

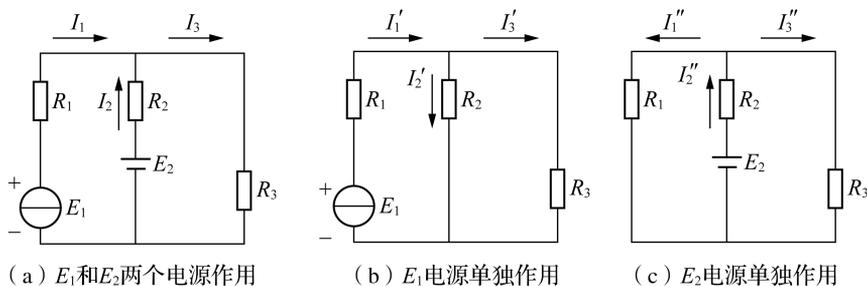


图 4-13 叠加原理

由此可见，在一个含有多个电源的电路中，任一支路的电流（或电压），等于在电路中各部分电阻不变的情况下，各电源单独作用时所产生的电流（或电压）的代数和。

应用叠加定理求电路中各支路电流的具体步骤如下。

(1) 将原电路进行分解，做出各个电源单独作用时的分解电路图。所谓电路中只有一个电源单独作用，就是假设其余电源都为零（恒压源短路、恒流源开路），而保留各电源

内阻。

(2) 应用电阻串联、并联的计算方法, 分别求出各分电路中每一支路电流的大小及方向。

(3) 根据原电路电流方向与各分电路电流方向, 写出各支路电流的叠加关系, 求出各支路电流。

【例 4-3】 在图 4-14 (a) 中, $I_s=2\text{ A}$, $E=2\text{ V}$, $R_1=3\ \Omega$, $R_2=1\ \Omega$, $R_3=2\ \Omega$ 。试用叠加定理求出 R_3 支路的电流 I_3 。

解: 当 I_s 单独作用时, 如图 4-14 (b) 所示。

$$I'_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_s = \frac{1}{1 + 2} \times 2 = \frac{2}{3}\text{ A}$$

当 E 单独作用时, 如图 4-14 (c) 所示。

$$I''_3 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{2}{1 + 2} = \frac{2}{3}\text{ A}$$

所以

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} \approx 1.33\text{ A}$$

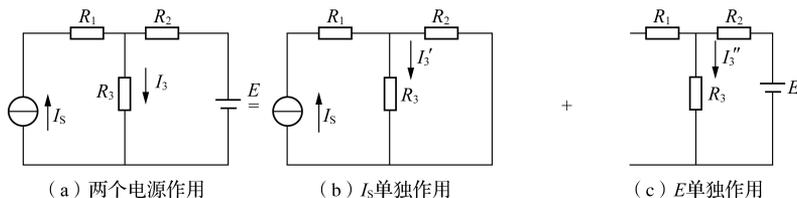


图 4-14 例 4-3 图

应用叠加定理时, 应注意下面几个问题。

(1) 叠加定理只能用来求线性电路中的电流或电压, 而不能直接用来计算功率, 这是由于功率是电流或电压的二次函数。我们以电阻 R_3 的功率为例, 显然

$$P_3 = R_3 I_3^2 = R_3 (I'_3 + I''_3)^2 \neq R_3 (I'_3)^2 + R_3 (I''_3)^2$$

(2) 对非线性电路, 叠加定理不适用。

(3) 叠加时要注意电流 (电压) 的参考方向, 至于各电流 (电压) 前取正号或负号, 应根据原电路电流 (电压) 参考方向与分电路电流 (电压) 的参考方向是否一致而定。

(4) 应用叠加定理分解电路时, 某一电源单独作用, 对于其他电源, 不论是电压源或电流源, 都要保留其内阻, 把恒压源短路, 恒流源开路。

(5) 叠加定理可以简化线性电路的计算, 但对于多支路、多个电源的电路, 用叠加定理却比较烦琐。

(6) 应用叠加定理的重要性不仅在于简化线性电路的计算, 而更重要的是, 叠加定理反映了线性电路各元件上电流 (电压) 的成因。它是分析线性电路的重要方法和依据, 有

助于对线性电路性质的理解，可以用来推导其他电路定理。例如，今后在分析非正弦电路、过渡过程等都将应用这一定理。

四、叠加定理的优点

1. 简化计算

叠加定理将复杂电路的分析分解为多个简单电路的分析，大大简化了计算过程。

2. 直观理解

通过逐个考虑每个独立电源的作用，可以更直观地理解电路的工作原理。

3. 适用广泛

叠加定理适用于任何线性电路，无论是直流电路还是交流电路。

五、叠加定理的局限性

1. 不适用于非线性电路

叠加定理不适用于非线性电路。在非线性电路中，元件的特性不能用线性方程描述，不满足齐次性和叠加性。

2. 不适用于受控源

叠加定理不适用于受控源（如电压控制电压源、电流控制电流源等）。受控源的输出依赖于其他电路元件的状态，不能简单地置零。

任务实施

一、画电路图

运用 Multisim10 软件，绘制如图 4-15 所示电路图。

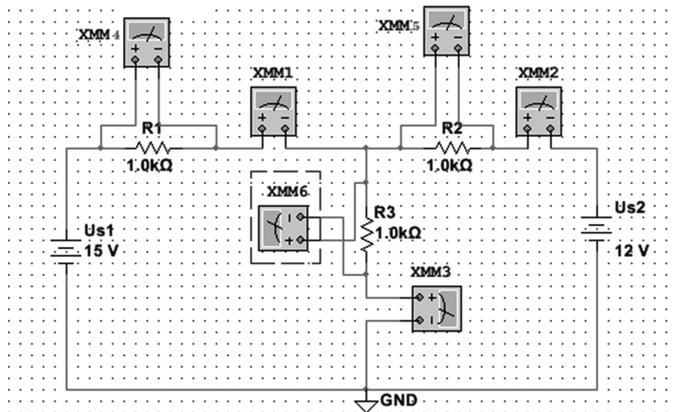


图 4-15 仿真实验电路

二、仿真测量

1. U_{S1} 单独作用

当 U_{S1} 单独作用时，仿真测量结果如图 4-16 所示。

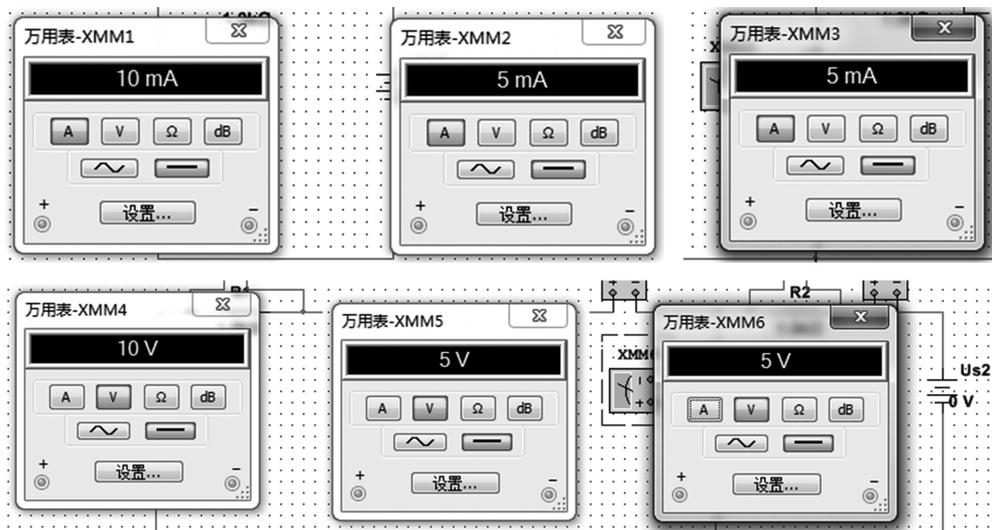


图 4-16 U_{S1} 单独作用时的仿真结果

2. U_{S2} 单独作用

当 U_{S2} 单独作用时，仿真测量结果如图 4-17 所示。

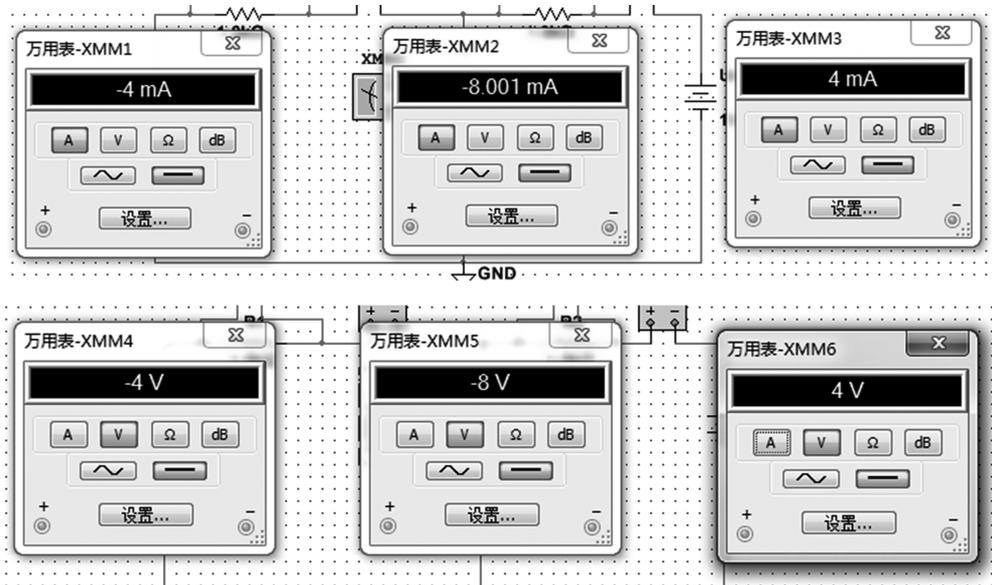


图 4-17 U_{S2} 单独作用时的仿真结果

3. U_{S1} 和 U_{S2} 共同作用

当 U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用时，仿真测试结果如图 4-18 所示。

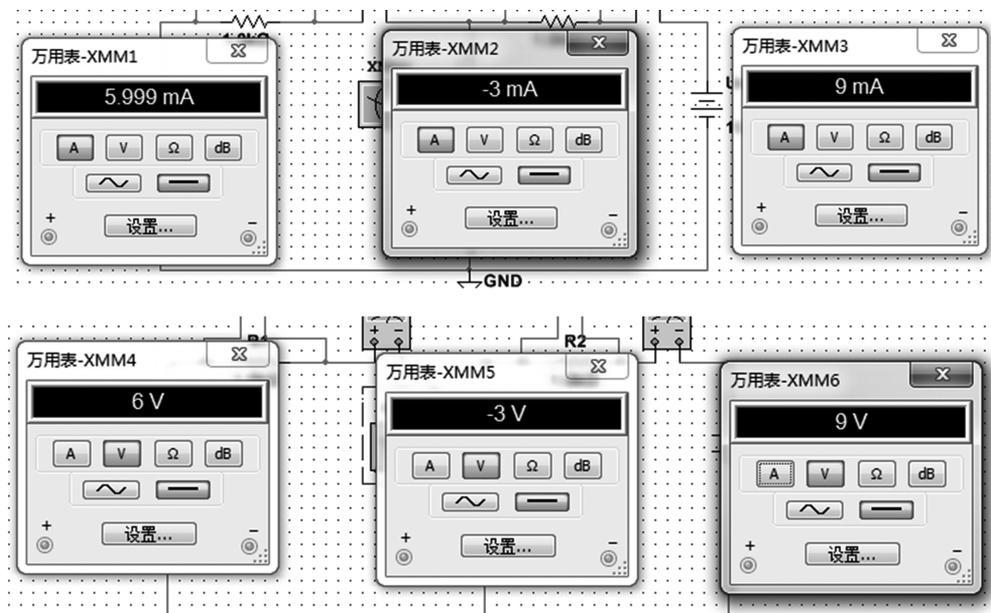


图 4-18 U_{S1} 和 U_{S2} 共同作用时的仿真结果

4. 仿真结果分析

将上述仿真测试结果填入表 4-2 中，从数据（保留整数）可以看到，当 U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用时所测得的电流或两点间产生的电压降，等于当 U_{S1} 、 U_{S2} 分别单独作用时，在该部分所产生的电流或电压降的代数和，完成了叠加定理的验证。

表 4-2 仿真测试实验数据

参数	I_{R1}/mA	I_{R2}/mA	I_{R3}/mA	U_{R1}/V	U_{R2}/V	U_{R3}/V
U_{S1} 单独作用的测量值	10	5	5	10	5	5
U_{S2} 单独作用的测量值	-4	-8	4	-4	-8	4
共同作用时的测量值	6	-3	9	6	-3	9

任务 4 戴维南定理的验证

任务描述

戴维南定理是电路分析中的一个重要定理，它指出：任何一个线性有源二端网络，都可以用包含一个等效的电压源（戴维南电压 V_{th} ）和一个串联电阻（戴维南电阻 R_{th} ）的等效电路来替代。这个等效电路对外电路的作用与原电路完全相同。

本任务将通过实验验证戴维南定理，即任何线性有源二端网络均可等效为一个电压源（戴维南电压）与电阻（戴维南电阻）的串联组合。通过搭建电路，测量有源二端网络的开路电压和短路电流，计算戴维南等效参数，并对比等效电路与原电路的输出特性，验证定理的正确性。

相关知识

一、电源等效变化

1. 电压源

实际的电压源的端电压都是随着电流的变化而变化的。例如，当电池接通负载后，其电压就会降低，这是因为电池内部存在电阻的缘故。由此可见，电压源可用数值等于 U_s 的理想电压源和一个内阻 R_i 相串联的模型来表示，如图 4-19（a）所示。

于是，实际直流电压源的端电压为

$$U = U_s - U_r = U_s - IR_i \quad (4-7)$$

式中， U_s 的参考方向与 U 的参考方向一致，取正号； U_r 的参考方向与 U 的参考方向相反，取负号。

式（4-7）所描述的 U 与 I 的关系，即直流电压源的伏安特性，如图 4-19（b）所示。

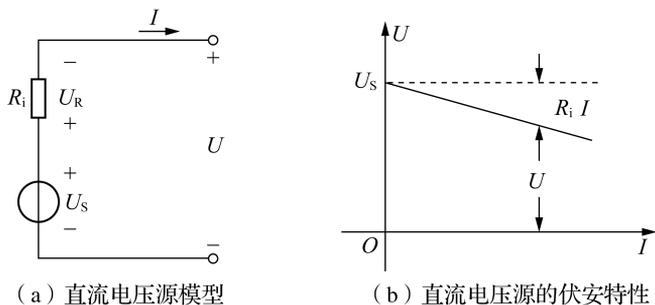


图 4-19 直线电压源及伏安特性

2. 电流源

电流源输出的电流随着端电压的变化而变化。例如，光电池在一定照度的光线照射下，被光激发产生的电流，并不能全部外流，其中的一部分将在光电池内部流动。直流电流源可用数值等于 I_s 的理想电流源和一个内阻 R'_i 相并联的模型来表示，如图 4-20 (a) 所示。实际直流电流源的输出电流为

$$I = I_s - \frac{1}{R'_i}U \quad (4-8)$$

式中， I_s 为实际直流电流源产生的恒定电流； $\frac{U}{R'_i}$ 为其内部分流电流。

式 (4-8) 所描述的 U 与 I 的关系，即直流电流源的伏安特性，如图 4-20 (b) 所示。

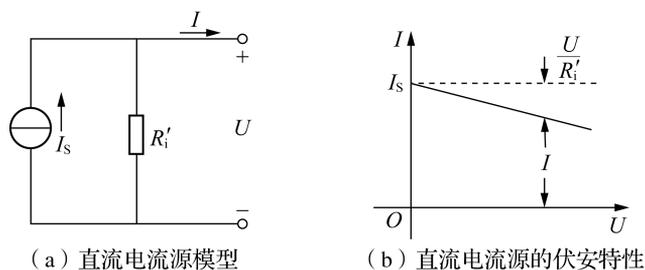


图 4-20 实际电流源及伏安特性

3. 电源的等效变换

任何一个电源本身都具有内阻，因而电源的电路模型往往由理想电源元件与其内阻组合而成。理想电源元件有电压源和电流源，两者可以进行等效变换，如图 4-21 所示。

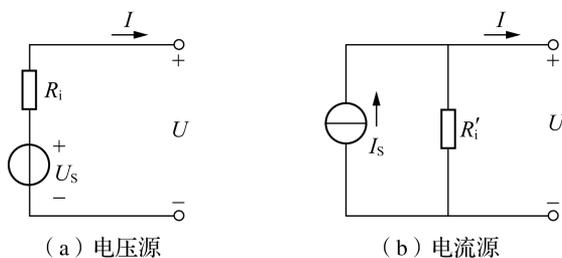


图 4-21 电源等效变换

在图 4-21 (a) 中： $U = U_s - IR_i$ ， U_s 为电压源的电压。

在图 4-21 (b) 中： $I = I_s - \frac{1}{R'_i}U$ 。整理后得： $U = I_s R'_i - IR'_i$ 。

电压源和电流源若要等效互换，其伏安特性方程必相同，则其电路参数必须满足条件： $R_i = R'_i$ ； $U_s = I_s R'_i$ 。即当电压源等效变换成电流源时，电流源的电流等于电压源的电压与其内阻的比值，电流源的内阻等于电压源的内阻；当电流源等效变换成电压源时，电压

源的电压等于电流源的电流与其内阻的乘积，电压源的内阻等于电流源的内阻。

当等效互换时，须重视电压源的电压极性与电流源的电流方向之间的关系，即两者的参考方向要求一致，也就是说电压源的正极对应着电流源电流的流出端。

二、戴维南定理及其应用

1. 戴维南定理

戴维南定理也称为“等效发电机原理”。戴维南定理指出：任何一个线性有源二端网络，对于外电路而言，可以用一个理想电压源和内阻相串联的电路模型来代替，如图 4-22 所示。并且理想电压源的电压就是有源二端网络的开路电压 U_{OC} ，即将负载断开后 a、b 两端之间的电压。内阻等于有源二端网络中所有电压源短路（即其电压为零）、电流源开路（即其电流为零）时的等效电阻 R_i 。

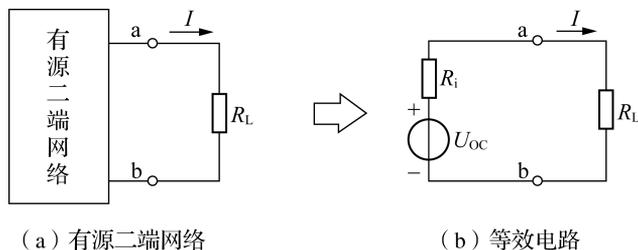


图 4-22 戴维南等效电路

因此对一个复杂的线性有源二端网络的计算，关键是求戴维南等效电路。

2. 戴维南定理的应用条件

1) 线性网络

戴维南定理仅适用于线性电路，即电路中的元件（如电阻、电感、电容等）均为线性元件。线性元件的特性可以用线性方程描述，满足齐次性和叠加性。

2) 有源二端网络

电路必须是有源的（包含独立电源或受控源）且是二端网络的（有两个端口与外部电路相连）。

3. 求戴维南等效电路的步骤

- (1) 求出有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。
- (2) 将有源二端网络的电压源短路，电流源开路，求出无源二端网络的等效电阻 R_i 。
- (3) 画出戴维南等效电路图。

【例 4-4】 求如图 4-23 (a)、(b) 所示电路的戴维南等效电路。

(1) 由图 4-23 (a)，求有源二端网络的开路电压 U_{OC} 。

解： 设回路绕行方向是顺时针方向，则

$$I = \frac{12}{4 + 2} = 2 \text{ A}$$

$4\ \Omega$ 电阻的电压 U 为

$$U = RI = 4 \times 2\ \text{V} = 8\ \text{V}$$

$$U_{\text{oc}} = U_{\text{ab}} = [-6 + (-8) + 12]\ \text{V} = -2\ \text{V}$$

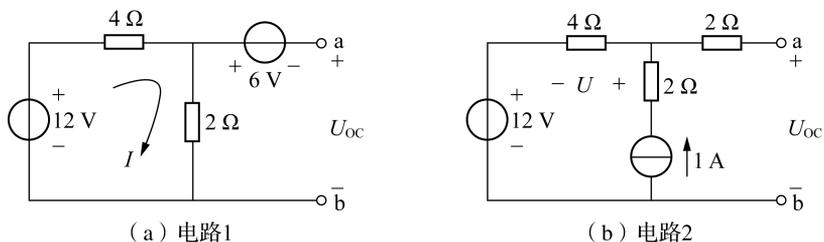


图 4-23 例 4-4 电路

求内阻 R_i ，将电压源短路，得图 4-24 所示电路。

$$R_i = \frac{4 \times 2}{4 + 2}\ \Omega \approx 1.33\ \Omega$$

戴维南等效电路如图 4-25 所示，注意电压源的方向。

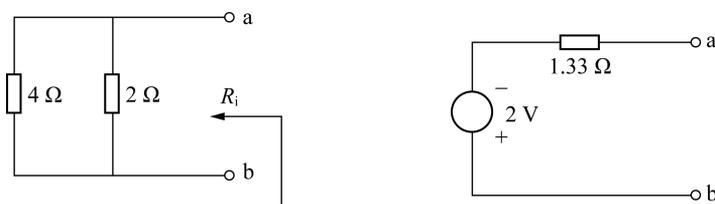


图 4-24 例 4-4 电路 1 等效电阻 图 4-25 例 4-4 电路 1 的戴维南等效电路

(2) 由图 4-23 (b)，求有源二端网络的开路电压 U_{oc} 。

解：由于回路中含有电流源，所以回路的电流为 $1\ \text{A}$ ，方向为逆时针方向。

$4\ \Omega$ 电阻的电压为

$$U = RI = 4 \times 1\ \text{V} = 4\ \text{V}$$

开路电压 U_{oc} 为

$$U_{\text{oc}} = (4 + 12)\ \text{V} = 16\ \text{V}$$

求内阻 R_i ，将电压源短路，电流源开路，得如图 4-26 所示电路。

$$R_i = (2 + 4)\ \Omega = 6\ \Omega$$

戴维南等效电路如图 4-27 所示。



图 4-26 例 4-4 电路 2 等效电阻

图 4-27 例 4-4 电路 2 戴维南等效电路

【例 4-5】用戴维南定理求如图 4-28 (a) 所示分压器电路中, 负载电阻 R 分别为 $100\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 的电流和电压。

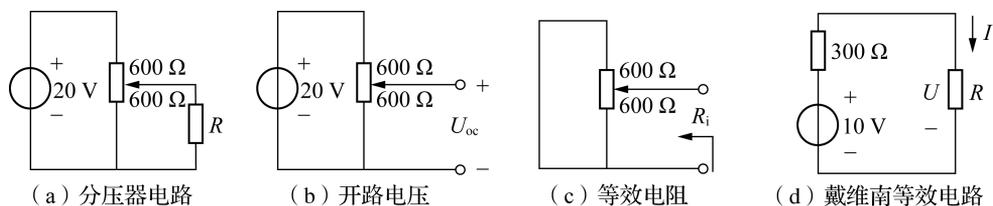


图 4-28 例 4-5 电路

解: 将负载电阻 R 断开, 余下的电路是一个线性有源二端网络, 如图 4-28 (b) 所示。

(1) 求该线性有源二端网络的开路电压 U_{oc} 。

$$U_{oc} = \frac{600}{600 + 600} \times 20\ \text{V} = 10\ \text{V}$$

(2) 求等效电源的内阻 R_i 。将电压源短路, 得如图 4-28 (c) 所示电路。

$$R_i = \frac{600 \times 600}{600 + 600}\ \Omega = 300\ \Omega$$

(3) 画出戴维南等效电路, 如图 4-28 (d) 所示。

当 $R = 100\ \Omega$ 时,

$$I = \frac{10}{300 + 100}\ \text{A} = 0.025\ \text{A}$$

$$U = RI = 100 \times 0.025\ \text{V} = 2.5\ \text{V}$$

当 $R = 200\ \Omega$ 时,

$$I = \frac{10}{300 + 200}\ \text{A} = 0.02\ \text{A}$$

$$U = RI = 200 \times 0.02\ \text{V} = 4\ \text{V}$$

三、知识能力拓展

既然电压源与电阻的串联组合可以等效变换为电流源与电阻的并联组合, 那么一个线性有源电阻性二端网络可以用一个电压源与电阻串联组合替代, 不难想象, 也可以用一个电流源与电阻并联组合等效替代。

诺顿定理指出, 任何一个线性有源电阻性二端网络, 对外电路而言, 总可以用一个电流源和一个电阻关联等效替代, 这个电流源的电流等于该网络的短路电流, 并联的电阻等于该网络内部的独立电源置零后的等效电阻。这一电流源与电阻的并联电路称为诺顿等效电路。

【例 4-6】如图 4-29 (a) 所示电路, 已知电阻 $R_1 = 4\ \Omega$, $R_2 = R_3 = 2\ \Omega$, $R_4 = R_5 = R_6 = 1\ \Omega$, 电压 $U_{S1} = U_{S2} = 40\ \text{V}$, 试用诺顿定律求电流 I_3 。

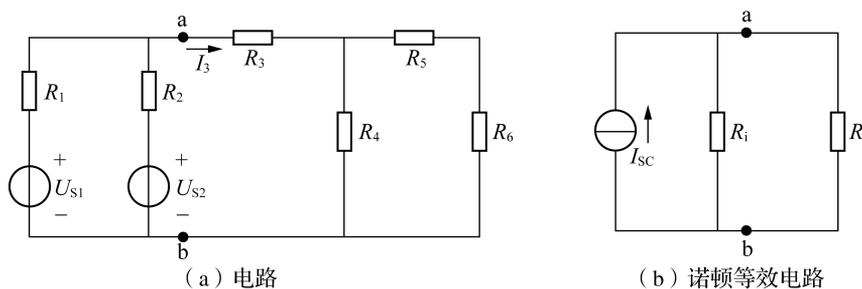


图 4-29 例 4-6 电路

解：首先求出图 4-29 (a) 中 a、b 左侧电路的诺顿等效电路，如图 4-29 (b) 中 a、b 左侧电路所示。其中

$$I_{SC} = \frac{U_{S1}}{R_1} + \frac{U_{S2}}{R_2} = \left(\frac{40}{4} + \frac{40}{2} \right) \text{A} = 30 \text{ A}$$

$$R_i = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \times 2}{4 + 2} \Omega = \frac{4}{3} \Omega$$

再求图 4-29 (a) 中 a、b 右侧电路的等效电阻 R ，则有

$$R = R_3 + \frac{(R_5 + R_6) \times R_4}{R_5 + R_6 + R_4} = \left[2 + \frac{(1 + 1) \times 1}{1 + 1 + 1} \right] \Omega = \frac{8}{3} \Omega$$

最后作出总的等效电路如图 4-29 (b) 所示，计算电流 I_3 ，则有

$$I_3 = I_{SC} \times \frac{R_i}{R_i + R} = 30 \times \frac{\frac{4}{3}}{\frac{4}{3} + \frac{8}{3}} \text{A} = 10 \text{ A}$$

四、戴维南定理的应用

1. 电路简化

1) 复杂电路的简化

在分析复杂电路时，戴维南定理可以帮助简化电路。通过将线性有源二端网络等效为一个简单的电压源和电阻，可以大大简化电路分析过程。

2) 负载分析

在分析负载对电路的影响时，戴维南定理可以帮助快速确定负载的电压和电流。通过计算戴维南等效电路，可以轻松分析不同负载条件下的电路响应。

2. 电源设计

1) 电源等效

在设计电源电路时，戴维南定理可以帮助分析多个电源组合对负载的影响。通过将多个电源等效为一个简单的电压源和电阻，可以优化电源设计，确保负载获得稳定的电压或

电流。

2) 电源分配

在电源分配系统中，戴维南定理可以帮助分析不同电源对各支路的影响。通过将电源等效为戴维南电路，可以合理分配电源，提高系统的可靠性。

任务实施

一、戴维南定理验证

1. 画电路图

在 Multisim10 软件上绘制如图 4-30 所示的仿真电路。

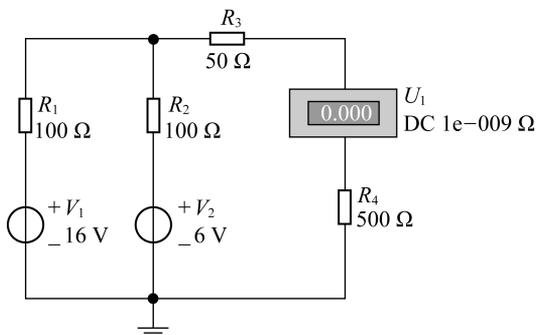


图 4-30 仿真电路

2. 仿真测量

开启仿真开关，读出电流表的读数，即负载 R_4 上电流 I_L ，将数据记入表 4-3 中。

3. 测开路电压 U_{oc}

将负载开路，如图 4-31 所示，开启仿真开关，调用电压表测量开路电压 U_{oc} ，将读数记录入表 4-3 中。

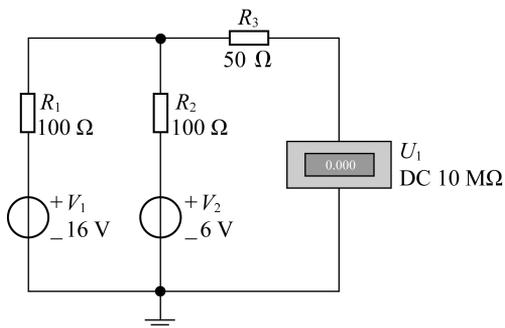


图 4-31 开路电压 U_{oc} 测量电路

4. 测戴维南等效电阻 R_0

将两组电压源短路，如图 4-32 所示，开启仿真开关，用万用表测出戴维南等效电路的电阻 R_0 ，将数据记录于表 4-3 中。

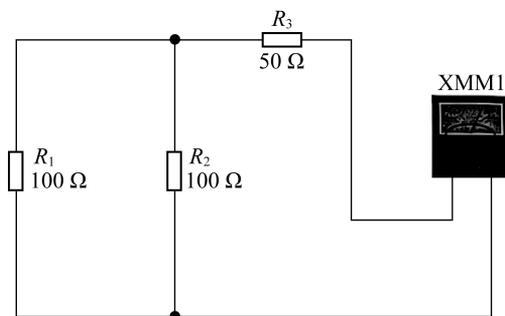


图 4-32 戴维南等效电阻 R_0 测量电路

5. 用等效电路求负载电流 I_L'

根据表 4-3 中所测数据可得到线性有源二端网络的戴维南等效电路，如图 4-33 所示，读出电流表读数，即负载电流 I_L' ，记录于表 4-3 中。

表 4-3 数值记录

被测值	I_L/mA	U_{oc}/V	R_0/Ω	I_L'/mA
测量值				

6. 分析验证

根据表 4-3 中数据，对比负载电流 I_L 及 I_L' 是否一致，验证戴维南定理的正确性。

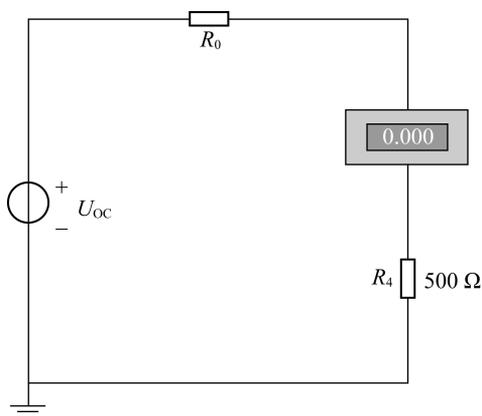


图 4-33 戴维南等效电路