



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



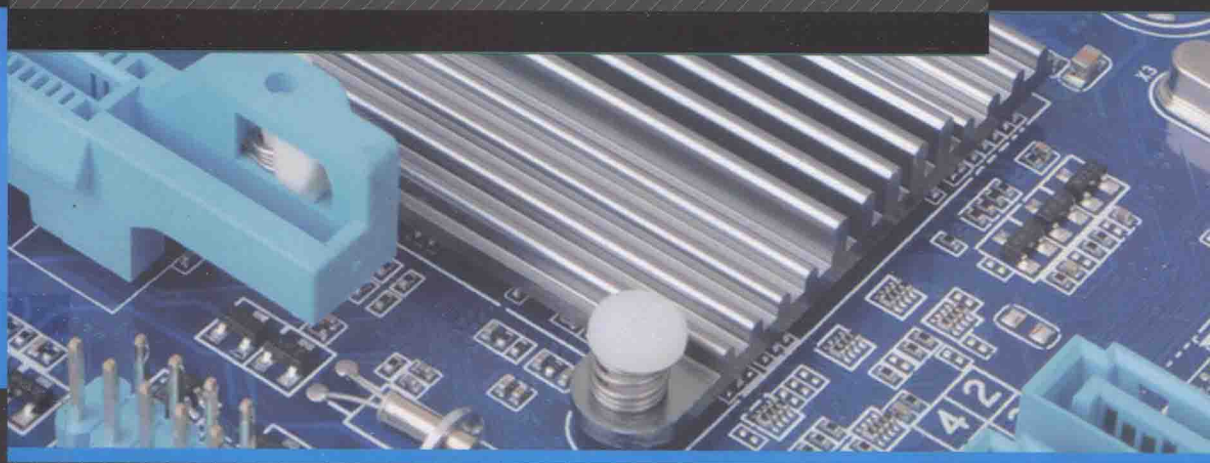
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Experiment of Circuit Analysis

电路分析 实验教程 (第2版)

陶秋香 杨焱 叶蓁 邓谦 胡志伟 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Experiment of Circuit Analysis

电路分析 实验教程

陶秋香 杨焱 叶蓁 邓谦 胡志伟 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电路分析实验教程 / 陶秋香等编著. -- 2版. -- 北京: 人民邮电出版社, 2016.2
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-41530-1

I. ①电… II. ①陶… 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(2016)第015045号

内 容 提 要

本书是“电路分析”课程配套实验教材, 与电路理论课程结合使用, 构成了电路分析课程的完整知识体系。

本书包含三大实验类型, 并且介绍了实验所需器件清单及目前常规数字化教学仪器使用说明。三大类实验分别为验证性、设计性和仿真性实验, 涵盖了电路经典原理及其应用, 使学生进一步理解、深化和拓宽已掌握的理论知识, 有效地加深对学科体系的认知, 更有利于培养学生的团队协作能力、科研能力、独立思考能力以及创新意识。

本书可以作为电子信息工程、通信工程、计算机、网络工程、电子科学与技术、自动化等相关专业的实验教材。授课老师可以根据自己院校的教学大纲和教学计划, 灵活调整授课学时。

-
- ◆ 编 著 陶秋香 杨 焱 叶 蓁 邓 谦 胡志伟
责任编辑 刘 博
责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 9.25 2016 年 2 月第 2 版
字数: 229 千字 2016 年 2 月北京第 1 次印刷
-

定价: 29.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

一、课程性质

本课程实验是为电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、计算机科学与技术等信息工程类专业本科生开设的专业技术基础课，是一门重在实际操作，从理论向实践过渡的必修实验课程。

通过本课程实验的教学，使学生能够基本掌握常用电子仪器（数字万用表、交流毫伏表、信号源、直流稳压电源、示波器等）的正确使用方法，掌握基本电参数（交/直流电压、交/直流电流、频率、相位差等）的测量方法及技巧，掌握电路的基本测试方法（时域、频域），掌握电子元器件的国标系列标识及正确选择、测试、使用电子元器件，初步学习电路的设计方法。同时培养学生严肃、认真、端正的实验态度，并学会写出合格的实验报告（包括对测试结果数据的基本分析和处理）。

二、项目设置

本书是“电路分析”课程配套实验教材，与电路理论课程结合使用，构成了电路分析课程的完整知识体系。

本书具有如下特点。

（1）内容完整：包括三大类实验类型，并且介绍了实验所需器件清单及目前常规数字化教学仪器使用说明。

（2）层次分明：实验分为验证性、设计性和仿真性实验，涵盖了电路经典原理及其应用，使学生进一步理解、深化和拓宽已掌握的理论知识，有效地加深对学科体系的认知，更有利于培养学生的团队协作能力、科研能力、独立思考能力和创新意识。

建议授课学时安排如下：针对信息工程类本科专业实验教学独立设课要求，安排 20 个实验学时。其中，验证性实验 10 学时（5 个实验，其中基尔霍夫定律、叠加定理和戴维南定理、正弦交流电路中 RLC 元件的性能必选），设计性实验 6 个学时（两个实验，其中一阶网络响应特性的研究必选），仿真性实验 4 个学时（可配合前两大类实验项目进行选择）。由于实验课时有限，各相关专业可根据本专业实际教学情况，灵活选做上述实验来进行教学。

感谢信息工程学院电工电子教学实验中心、电子工程系老师的支持与帮助，他们为本书的形成及出版付出了辛勤的劳动，在此一并表示诚挚的谢意。

编者

2015 年 12 月

目 录

第一部分 验证性实验	1	实验三 谐振电路	58
实验一 电压源与电压测量仪器.....	2	实验四 交流电路参数的测量	61
实验二 常用电子仪器的使用.....	4	实验五 RC 选频网络特性研究	64
实验三 万用表测量电压、电流.....	6	实验六 移相电路设计与测试	66
实验四 元件伏安特性.....	9	第三部分 Multisim 电路仿真实验	69
实验五 基尔霍夫定律.....	15	实验一 元件伏安特性的测试	77
实验六 受控源特性的研究	18	实验二 基尔霍夫定律	79
实验七 叠加定理和戴维南定理	23	实验三 叠加定理与戴维南定理	80
实验八 正弦交流电路中 RLC 元件的 性能	27	实验四 一阶积分微分电路	85
实验九 串联谐振电路	31	实验五 二阶动态电路	88
实验十 三相电路电压与电流的测量	36	实验六 R、L、C 元件性能的研究	90
实验十一 二阶动态电路暂态过程的 研究	39	实验七 RLC 串联谐振电路	93
实验十二 功率因数提高的实验	41	实验八 三相电路	97
实验十三 耦合电感的研究	45	实验九 功率因数的提高.....	100
实验十四 双口网络参数的测量	48	附录	101
第二部分 设计型实验	51	附录一 实验课程基本知识.....	101
实验一 等效变换	52	附录二 实验报告格式.....	106
实验二 一阶网络响应特性的研究	55	附录三 元件清单.....	110
		附录四 常用仪器的使用介绍.....	113

这部分实验所包含的内容与电路基础理论有密切联系，通过这些实验，学生应当达到如下要求。

1. 掌握常用电子仪表（如直流电源、万用表、函数信号发生器、双踪示波器、交流毫伏表等）的基本工作原理和正确使用方法。

2. 能识别各种元器件（如电阻、电位器、电容和电感等），掌握其参数测量原理和测量方法。

3. 了解电信号的时域特性和频域特性、元件的伏安特性及其测量方法。

4. 了解两个电信号的相位差、电路等效及其实验方法。

5. 掌握仪表在测量电路中的正确连接和对被测电路的影响，能考虑测试方法对测量结果的影响。

6. 能找出测量数据产生误差的原因，并具备一定的测量误差分析和测量数据的处理能力。

通过这些实验，可提高学生分析问题和解决问题的能力，培养学生勤奋进取、严肃认真、实事求是和理论联系实际的科学态度。

实验一 电压源与电压测量仪器

一、实验目的

- 1. 掌握电压源（直流稳压电源和函数信号发生器）的功能、技术指标和使用方法。
- 2. 掌握指针式万用表、数字式万用表及交流毫伏表的功能、技术指标和使用方法。
- 3. 学会正确选用电压表测量直流、交流电压及含有直流电平的交流电压。

二、实验原理

实验原理参见附录四，阅读直流稳压电源、函数信号发生器、数字万用表及交流毫伏表的使用规则。

三、实验内容及步骤

1. 直流电压测量

采用数字万用表测量直流电压。

测量方法：确定测量仪器设置在直流电压测量状态；将测量仪器（COM）端与被测电源（COM）端相连，则测量笔接触被测点即可测量被测点的电压。若已知被测电压时，应根据被测电压大小，选择合适量程，使测量数据达到最高精度；若未知被测电压时，应将测量仪器量程置于最大，然后逐渐减少量程，使测得数据的有效数字最多。

- （1）固定电源测量：测量稳压电源的固定电压 5V 和 12V，并记录于表 1-1-1。
- （2）可变电源测量：按表 1-1-1 调节稳压电源输出并测量之。

表 1-1-1 直流电压测量

电源表头指示值 (V)	固定电源测量		可变电源测量		
	5V	12V	6V	10V	18V
数字万用表测量值 (V)					
相对误差 (%)					

2. 正弦电压（有效值）的测量

- （1）函数信号发生器输出正弦波，信号频率 300Hz，输出幅度分别为 10mV、500mV、1V、4V，同时用数字万用表和交流毫伏表按表 1-1-2 进行测量。

- （2）将信号发生器频率改为 $f_s = 100\text{kHz}$ ，重复上述测量，记录于表 1-1-2。

表 1-1-2 正弦电压测量

f_s	输出电压 (V)	10mV	500mV	1V	4V
300Hz	数字万用表测量值 (V)				
	相对误差 (%)				
	交流毫伏表测量值 (V)				
	相对误差 (%)				
100kHz	数字万用表测量值 (V)				
	相对误差 (%)				
	交流毫伏表测量值 (V)				
	相对误差 (%)				

四、实验仪器

- | | |
|------------|-----|
| 1. 直流稳压电源 | 1 台 |
| 2. 函数信号发生器 | 1 台 |
| 3. 数字万用表 | 1 台 |
| 4. 交流毫伏表 | 1 台 |

五、预习要求

仔细阅读实验内容，了解各仪器技术性能和使用方法。

六、报告要求

1. 整理实验数据，并对测量结果进行必要的分析或讨论。
2. 回答下列思考题：
 - (1) 用数字万用表及交流毫伏表测量正弦波，表头显示的是正弦电压的什么值？
 - (2) 可否用数字万用表及交流毫伏表测量三角波、斜波、锯齿波？
3. 谈谈本次实验的体会。

实验二 常用电子仪器的使用

一、实验目的

- 1. 了解电子电路实验中常用的电子仪器——示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表等的主要技术指标、性能及正确使用方法。
- 2. 初步掌握用双踪示波器观察正弦信号波形和读取波形参数的方法。

二、实验原理

在模拟电子电路实验中，经常使用的电子仪器有示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表等。这些仪器和万用表一起使用，可以完成对模拟电子电路的静态和动态工作情况的测试。

实验中要对各种电子仪器进行综合使用，可按照信号流向，以连线简捷、调节顺手、观察与读数方便等原则进行合理布局，各仪器与被测实验装置之间的布局与连接如图 1-2-1 所示。为防止外界干扰，接线时应注意各仪器的公共接地端应连接在一起（称共地），信号源和交流毫伏表的引线通常用屏蔽线或专用电缆线，示波器接线使用专用电缆线，直流电源的接线用普通导线。

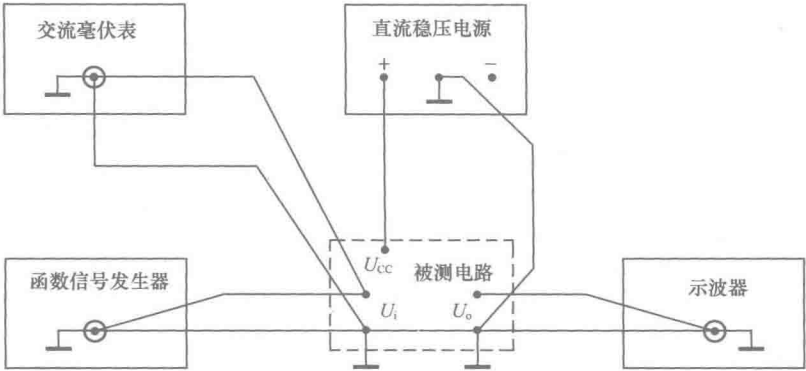


图 1-2-1 模拟电子电路中常用电子仪器布局图

三、实验内容及步骤

1. 正弦信号的观察及输出电压的测量

调节函数信号发生器的有关旋钮，使其输出的正弦波信号频率为 1kHz，按表 1-2-1 中的数值进行相应的测试，并将结果记录于表 1-2-1 中。

表 1-2-1 实验数据记录

信号源输出电压		示波器测量输出电压	
		峰—峰值	有效值
峰—峰值	2V		
有效值	500mV		

2. 正弦信号频率的测量

调节函数信号发生器的有关旋钮，使输出频率分别为 100Hz、1kHz 及 100kHz，峰—峰值均为 2V（示波器测量值）的正弦波信号。用示波器测量信号频率，并与函数信号发生器的频率比较，将结果记录于表 1-2-2 中。

表 1-2-2 实验数据记录

信号源频率	周期 (ms)	频率 (Hz)	频率相对误差
100Hz			
1kHz			
100kHz			

3. 直流信号的观察及测量

将直流稳压电源代替函数信号发生器，用示波器观察并记录直流电压波形。此时直流稳压电源输出电压分别为 5V、10V，测试前应记住扫描线的位置。将测试结果记录于表1-2-3 中。

表 1-2-3 实验数据记录

直流稳压电源输出电压	5V	10V
示波器测量值		
误 差		

四、实验仪器

- | | |
|------------|-----|
| 1. 数字示波器 | 1 台 |
| 2. 函数信号发生器 | 1 台 |
| 3. 直流稳压电源 | 1 台 |
| 4. 交流毫伏表 | 1 台 |

五、预习要求

仔细阅读实验内容，了解各仪器技术性能和使用方法。

六、实验报告要求

- 整理实验数据，并对测量结果进行必要的分析或讨论。
- 回答下列思考题：
 - 函数信号发生器有几种输出波形？它的输出端能否短接？
 - 交流毫伏表是用来测量正弦波电压还是非正弦波电压的？它的表头指示值是被测信号的什么数值？它是否可以用来测量直流电压的大小？
- 谈谈本次实验的体会。

实验三 万用表测量电压、电流

一、实验目的

1. 了解万用表的测量原理, 学会使用万用表。
2. 了解内阻对测量结果的影响。

二、实验原理

1. 万用表内阻对电流、电压测量结果的影响

(1) 内阻对电压测量结果的影响

在测量电压时, 需要将万用表与被测支路并联, 为了使测量仪表的接入不影响被测电路的实际参量, 要求电压表的内阻为无穷大。但在实际使用中, 这个要求无法达到, 因此, 当电压表接入被测电路, 改变了原电路的工作状态时, 测量结果必然存在误差。以图 1-3-1 所示电路为例。

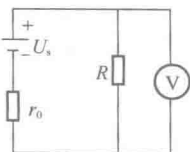


图 1-3-1 电压测量电路

在理想状况下, 电压表内阻 $R_V \rightarrow \infty$, 这时被测支路 R 两端的电压 U 为

$$U = \frac{R \times U_s}{r_0 + R} \quad (3-1)$$

此值可以认为是被测电压的真实值, 而实际上电压表内阻 R_V 不可能为 ∞ , 因此考虑到这个因素后, R 两端的电压为

$$U' = \frac{R // R_V}{r_0 + R // R_V} U_s \quad (3-2)$$

由式 (3-2) 可以看出: R_V 越大, U' 越接近于 U , 当 $R_V \gg R$ 时, $U' = U$ 。其相对误差为

$$\epsilon = \frac{U' - U}{U} \times 100\% \quad (3-3)$$

将式 (3-1)、式 (3-2) 代入式 (3-3), 简化得到测量相对误差为

$$\epsilon = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{Rr_0}{R_V(R+r_0)}} \right] \times 100\% \quad (3-4)$$

由式 (3-4) 可以知道: R_V 越大, ϵ 越小, 即电压表内阻越大, 测量值越准确。因此, 在测量电压时, 所选量程的内阻 R_V 应远大于被测支路的等效电阻 R , 即 $R_V \gg R$; 否则误差会很大。

电压表在不同量程下, 内阻不同。其大小与量程 U_M 的关系为

$$R_V = S_V \times U_M \quad (3-5)$$

S_V 为电压表的灵敏度, 即所用量程越大, 电压表内阻越大。因此, 在测量电压时, 应首先对被测支路等效电阻与电压表内阻作一粗略的比较, 以选择合适的量程。

(2) 内阻对电流测量结果的影响

在用电流表测量电流时, 也存在一个电流表内阻 R_I 对测量结果的影响问题。以图 1-

3-2 所示电路为例。

首先，考虑理想状态，电流表 $R_1=0$ 。

此时
$$I = \frac{U_s}{r_0 + R} \tag{3-6}$$

此值也是未接入电流表时电路中的电流真实值。考虑实际情况 $R_1 \neq 0$ 时：

$$I' = \frac{U_s}{r_0 + R + R_1} \tag{3-7}$$

比较以上两式，可以发现：由于 R_1 存在，测量值比真实值小。 R_1 越小， I' 越接近于 I 。当 $R_1 \ll (r_0 + R)$ 时，可以认为： $I' = I$ 。

其测量相对误差为

$$\epsilon = \frac{I' - I}{I} \times 100\% = \frac{1}{1 + \frac{1}{R_1}(r_0 + R)} \times 100\% \tag{3-8}$$

2. 测量电流的两种方法

(1) 直接法。直接将电流表串入被测支路来测电流的方法称为直接法，如图 1-3-2 所示。为了减小测量误差，要求： $(r_0 + R) \gg R_1$ 。

(2) 间接法。通过测被测支路已知电阻上的电压，利用 $I = U/R$ 来求电流的方法称为间接法。在被测支路等效电阻很小，或者不便于将电流表串入被测支路的情况下，可以考虑采用这种方法。为了减小误差，只需注意： $R_V \gg R$ 。间接法测量电路如图 1-3-3 所示。

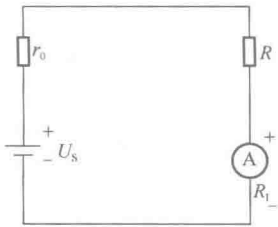


图 1-3-2 电流测量电路

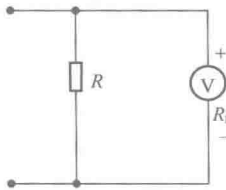


图 1-3-3 间接法测量电路

三、实验内容及步骤

用数字万用表测量图 1-3-4 所示电路中各电阻上的电压值，将结果记录表 1-3-1 中。

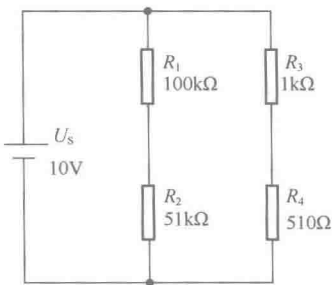


图 1-3-4 实验电路

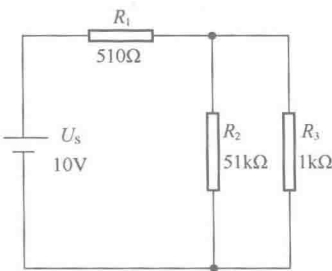


图 1-3-5 实验电路

表 1-3-1

电压	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{R4}
测量值 (V)				
理论计算值 (V)				
相对误差				

用间接法测量图 1-3-5 所示电路中各支路电流。结果记录在表 1-3-2 中。

表 1-3-2

R_1 项目	R_1	R_2	R_3
各电阻上的电压 (V)			
I_1 的测量计算值 (mA)			
I_1 的理论计算值 (mA)			
相对误差 (%)			

四、注意事项

1. 测量时要注意：电压表并联在被测支路，电流表串联在被测支路，并注意电流的方向性。
2. 合理选择量程，切勿使电表超量程。

五、实验仪器

- | | |
|-----------|-----|
| 1. 直流稳压电源 | 1 台 |
| 2. 万用表 | 1 只 |
| 3. 实验箱 | 1 台 |

六、预习要求

1. 预习万用表使用的有关知识,了解万用表使用时的注意事项。
2. 完成相应理论计算。

七、报告要求

1. 整理本次实验的测试数据, 并据此说明如何提高电压、电流测量的准确度。
2. 谈谈本次实验的体会。

实验四 元件伏安特性

一、实验目的

1. 掌握线性电阻元件和非线性电阻元件的伏安特性及其测量方法。
2. 了解线性元件与非线性元件特性的差别。
3. 掌握电源外特性的测量方法。
4. 练习实验曲线的绘制。

二、实验原理

1. 线性电阻元件的伏安特性

线性电阻元件的电压、电流关系可以用欧姆定律 $R=U/I$ 来描述。电阻 R 与电压、电流的大小和方向具有双向特性，它的伏安特性曲线是一条通过原点的直线，直线的斜率是电阻的阻值 R 。端电压与电流之间的关系可以绘成 $U-I$ 平面上的一条曲线，称为该元件的伏安特性曲线。电压和电流的测量只要用电压表和电流表测定，改变电压测出相应的电流，即可绘出元件的伏安特性，称为伏安测量法。

如图 1-4-1 (a) 所示，线性元件的 R 值不随电压或电流的大小的变化而改变，且成正比关系；同时线性元件上的电压和电流是同时并存的，与过去的电流大小无关，是无记忆元件。

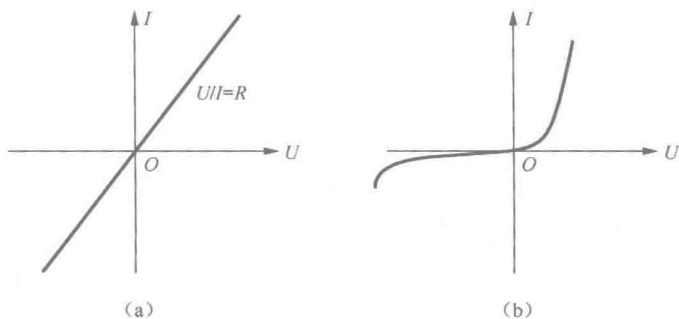


图 1-4-1 线性电阻元件和非线性电阻元件伏安特性曲线图

凡不符合上述条件的电阻元件称为非线性电阻元件。半导体二极管的伏安特性，如图 1-4-1 (b) 所示，半导体二极管的电阻值随着端电压的大小和极性的不同而不同。当直流电源的正极加于二极管的阳极而负极与阴极连接时，二极管的电阻值很小；反之二极管的电阻值很大，因此对于坐标原点来说是非对称性的，具有单向性的特点，即非双向性。这种性质为大多数非线性元件所具备。

一般的半导体二极管是一个非线性电阻元件，正向压降很小（一般的锗管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ ，硅管为 $0.5 \sim 0.7\text{V}$ ），正向电流随正向压降的升高而急骤上升，而反向电压从零一直升到十几伏到几十伏时其反向电流增加很小，粗略地可视为零。可见二极管有单向导电性，但反向电压加得过高，超过二极管的极限值，则会导致二极管击穿损坏。稳压二极管是一种特殊的二极管，其正向特性与普通的二极管类似，但其反向特性较特别。在反向电压开始增

加时, 其反向电流几乎为零; 当反向电压增加到某一定数值时 (此值称为二极管的稳压值, 有各种不同稳压值的稳压管), 电流将突然增加, 以后它的端电压将维持稳定, 不再随外加的反向电压的升高而增大。

用电压表和电流表测量电阻时, 由于电压表的内阻不是无穷大, 电流表的内阻不为零, 所以会给测量结果带来一定的方法误差。因此, 在测量某一支路的电压和电流时, 除应根据技术要求正确选择电流表和电压表的规格、精度和量程外, 在接线时应把电流表和电压表接在电路的正确位置上, 如果仪表位置不当也会造成较大的测量误差。

例如, 如图 1-4-2 所示, 测量 R 支路的电流和电压时, 电压表在线路中有两种连接方法可供选择, 如图中的 1-1' 点和 2-2' 点, 在 1-1' 点, 电流表的读数为流过 R 的电流, 而电压表的读数不仅会有 R 的电压降, 而且还含有电流表内阻的电压降。因此, 电压表的读数比实际要高。当电压表接在 2-2' 点时, 电压表的读数为 R 上的电压降, 而电流表的读数除含有 R 的电流外, 还含有流过电压表的电流值。

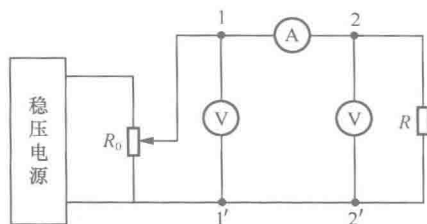


图 1-4-2 伏安法测量电阻电路

因此, 电流表的读数较实际值来得大。显然, 当 R 阻值比电流表的内阻大得多时, 电压表宜接在 1-1' 处; 当电压表的内阻比 R 的阻值大得多时, 则电压表的测量点应选择在 2-2' 处。实际测量时, 某一支路的电阻常常是未知的, 因此, 测量时可分别在 1-1'、2-2' 两点试一试; 如果在这两种接法下, 电压表的读数误差很小或无甚差别, 即可接在 1-1' 点; 如果在这两种接法下, 电流表的读数误差很小或无甚差别, 即可接在 2-2' 点。若两种接法, 电压表和电流表的读数均无甚差别, 则电压表可随意接在 1-1' 点或 2-2' 点。

2. 理想电压源

能够保持其端电压为恒定值且内部没有能量损失的电压源称为理想电压源。

理想电压源具有下列性质:

第一, 其端电压和流过它的电流大小无关; 第二, 流过理想电压源的电流并不由电压源本身决定, 而是由与之相连接的外电路所确定。理想电压源的伏安特性曲线如图 1-4-3 (a) 所示。

理想电压源实际上是不存在的, 实际电压源总是具有一定大小的内阻, 因此实际电压源可以用一个理想电压源和一个串联电阻来表示。当电压源中有电流流过时, 必然会在电阻上产生电压降, 因此, 实际的电压源的端电压 U 可表示为: $U = U_s - IR_s$ 。式中, I 为流过电压源的电流, U_s 为理想电压源的电压, R_s 为电压源的内阻。由上式可知实际电压源的伏安特性如图 1-4-3 (b) 所示。显然, 实际电压源的内阻 R_s 越小, 其特性越接近于理想电压源。

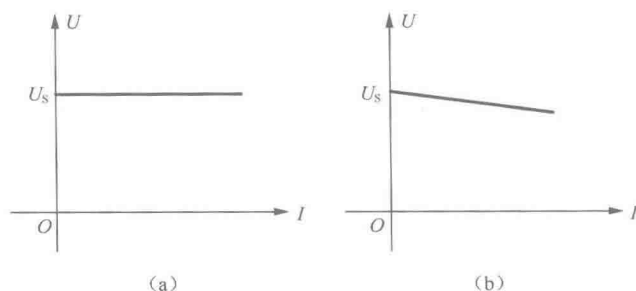


图 1-4-3 电压源伏安特性曲线

表 1-4-2

$\begin{matrix} U \\ I \end{matrix}$					
6V 稳压管					

(2) 反向特性：按图 1-4-6 接好线路，按表中数值测试相应电流，并记录于表1-4-3 中。

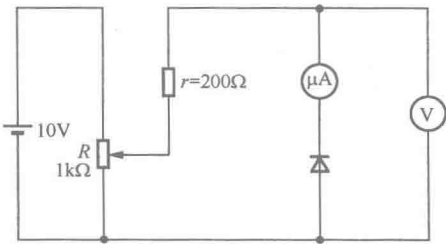


图 1-4-6 实验电路

表 1-4-3

$\begin{matrix} U \\ I \end{matrix}$					
6V 稳压管					

* 3. 测量直流稳压电源的伏安特性

(1) 测量理想电压源的伏安特性

实验采用直流稳压电源作为理想电压源，其内阻在和外电路电阻相比可以忽略不计的情况下，其输出电压基本维持不变，可以把直流稳压电源作为理想电压源。按图 1-4-7 所示连接线路，保持稳压电源输出为 10V， R_1 为 200Ω 的限流电阻，由大到小改变 R_2 阻值，将测得的 U 和 I 记录于表 1-4-4 中。

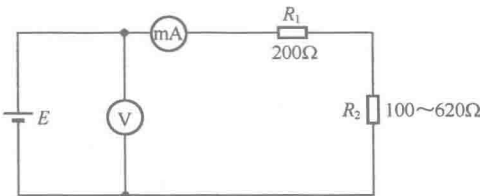


图 1-4-7 实验电路

表 1-4-4

R_2 (Ω)	620	510	390	300	200	100
I (mA)						
U (V)						

(2) 测定实际电压源的伏安特性

首先选取一个 51Ω 的电阻，作为直流稳压电源的内阻与稳压电源串联组成一个实际的电压源模型，实验电路如图 1-4-8 所示， R 阻值可变，实验步骤与前项相同，测量所得数