




高职高专机电类教学改革规划教材  
国家精品课程配套教材

# 电工及电气 测量技术

杨红 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件、习题答案及模拟试卷  
教师免费下载

高职高专机电类教学改革规划教材

国家精品课程配套教材

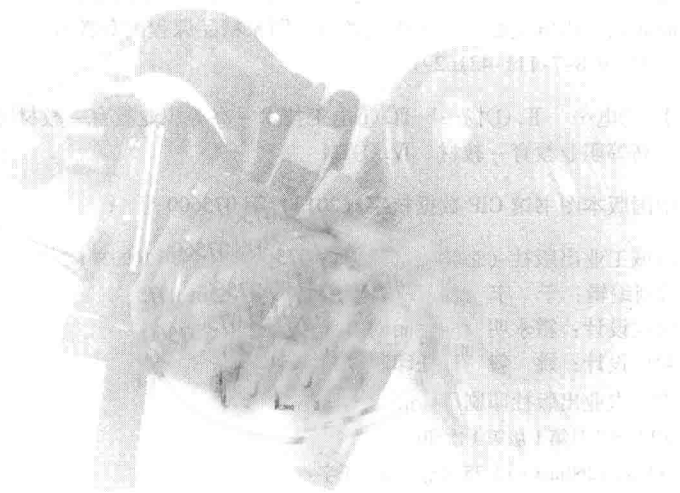
# 电工及电气测量技术

主 编 杨 红

副主编 徐 茜

参 编 郝英明 易 丹 欧 松

张 磊 李志斌



机械工业出版社

本书是高职高专机电类规划教材。全书共分8章,包括电路的基本概念和基本定律,直流电路的连接方法及分析,电路的分析方法,正弦交流电路,RLC串并联电路的分析,三相电路,变压器,电路的暂态分析以及EWB计算机仿真实验。

本书根据高职教学的特点,配以大量插图帮助学习,注重理论联系实际,特别增加了常用电工仪表的实际测量部分,论述清晰准确,深入浅出,重点突出,便于自学。为便于教师授课,本书特别备有免费电子课件,凡选用本书作为授课教材的老师均可来电索取,咨询电话:010-88379375。

本书实用性强,可作为高职、中职电气自动化、机电一体化、建筑电气、电气工程等专业学生的教材或参考书,亦可供广播电视大学、职工大学、业余大学以及应用型本科相关专业使用,对于从事电力应用方面的有关工程技术人员亦有较高的参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工及电气测量技术/杨红主编. —北京:机械工业出版社,2013.3

高职高专机电类教学改革规划教材 国家精品课程配套教材

ISBN 978-7-111-42162-7

I. ①电… II. ①杨… III. ①电工技术—高等职业教育—教材②电气测量—高等职业教育—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第075600号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:于宁 责任编辑:于宁 曹雪伟

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:姚毅 责任印制:李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2013年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.75印张·261千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42162-7

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

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

《电工及电气测量技术》是2004年高职高专国家精品课程“电工及电气测量技术”的配套教材，在正式出版之前，已经连续在校内七届学生的教学中使用了，并根据教学过程中的反馈进行了多次修订和完善。

在现代社会中，电与我们的生活密切相关，不可或缺。从我们日常生活用到的小家电，到高楼大厦、轨道交通以及工业生产，都需要用到电工的基本知识。但是因为电是看不见的，教学中多数学生反映电工教材的内容抽象，较难理解，学习内容与实际工作脱节，教材中内容没能反应电工科技发展。尤其对于职业院校的学生，注重的就是动手能力，对于某些教材中复杂的理论计算不但不知所措，也往往不感兴趣。

根据以上实际情况，编者经过多年的教学总结，结合高职学生的特点编写了本书。本书注重实用，突出重点，减少了复杂的理论推导和计算等内容，结合学生就业的情况，增加了一些符合市场需求的内容。本书特色如下：

1) 对电工的基本概念、基本理论、基本定律和基本分析方法做了通俗的阐述，尽可能多地使用图形和照片，以增加教材的趣味性，希望学生通过看图就能够理解书中的内容。

2) 将“电工学”与“电气测量”的基本内容融合在一起，编入了一些现在工程检测中常用的仪器仪表及其测量方法，学生可以边学边做，突出高职教学的特点，加深对理论知识的理解。

3) 将复杂的计算过程简化，工作中常用的计算和公式，通过大量的实例、习题进行练习巩固，提高应用能力。

4) 每章后面都有一个小结，将每章的主要内容和主要公式列于其中，便于学生复习、查阅。

本书考虑到与后续专业课的分工，不讨论综合性的用电知识和专用设备，只研究用电技术的一般规律和常用的电气元件、仪表、设备及基本电路。

本书各章节的编写人员分工如下：

第1章、第2章：杨红，郝英明、易丹。第3章：徐茜，郝英明、张磊。第4章、第5章、第7章：杨红。第6章、附录：徐茜、欧松。第8章：郝英明、李志斌。杨红负责统稿。

本书从确定选题、编写、教学试用和出版经历了漫长的八年时间，在此过程中，深圳职业技术学院的白广新、常江等几位老师以及机械工业出版社的于宁、曹雪伟等编辑给予了许多建设性的意见和真诚的指导，在此深表感谢！

同时要感谢过去七年和将来使用这本教材的老师和同学，你们的体会和意见，会让这本教材更加完美。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 电路的基本概念和基本定律····· 1

### 1.1 电路的组成与电路中的物理量····· 1

#### 1.1.1 电流····· 1

#### 1.1.2 电压····· 3

#### 1.1.3 电动势····· 3

#### 1.1.4 电位····· 4

### 1.2 电流和电压的方向····· 4

### 1.3 电流和电压的测量方法····· 5

#### 1.3.1 电流的测量····· 6

#### 1.3.2 电压的测量····· 6

#### 1.3.3 测量误差····· 7

### 1.4 电阻和欧姆定律····· 8

### 1.5 常用元件及电阻的测量方法····· 11

#### 1.5.1 电阻元件····· 11

#### 1.5.2 电容元件····· 13

#### 1.5.3 电感元件····· 14

#### 1.5.4 电阻的测量····· 14

### 本章小结····· 16

### 练习题····· 16

## 第 2 章 直流电路的连接方法及分析····· 19

### 2.1 电阻的连接方法····· 19

#### 2.1.1 电阻的串联····· 19

#### 2.1.2 电阻的并联····· 21

#### 2.1.3 串并联电路····· 22

#### 2.1.4 惠斯顿电桥····· 23

### 2.2 电压表和电流表的量程扩大····· 25

#### 2.2.1 电压表的量程扩大····· 25

#### 2.2.2 电流表的量程扩大····· 26

### 2.3 基尔霍夫定律····· 26

### 2.4 电源的两种模型····· 29

### 2.4.1 电压源模型····· 29

### 2.4.2 电流源模型····· 30

### 2.4.3 等效变换····· 30

### 2.5 功率····· 31

#### 2.5.1 功率的计算····· 31

#### 2.5.2 额定值····· 32

#### 2.5.3 用电量的计算····· 32

#### 2.5.4 最大功率传输定理····· 33

### 本章小结····· 34

### 练习题····· 35

## 第 3 章 电路的分析方法····· 41

### 3.1 支路电流法····· 41

### 3.2 节点电压法····· 42

### 3.3 叠加定理····· 43

### 3.4 戴维南定理和诺顿定理····· 45

### 3.5 受控源电路的分析····· 47

### 3.6 非线性电阻电路的分析····· 50

### 本章小结····· 51

### 练习题····· 52

## 第 4 章 正弦交流电路····· 56

### 4.1 正弦电压和电流····· 56

#### 4.1.1 正弦量的方向····· 56

#### 4.1.2 瞬时值····· 57

#### 4.1.3 幅值····· 58

#### 4.1.4 有效值····· 58

#### 4.1.5 正弦量的周期····· 58

#### 4.1.6 正弦量的频率····· 60

#### 4.1.7 正弦量的相位····· 61

### 4.2 常用交流仪器····· 63

#### 4.2.1 信号发生器····· 63

#### 4.2.2 示波器····· 64

|                               |            |   |            |
|-------------------------------|------------|---|------------|
| 4.3 正弦量的相量表示法 .....           | 69         | 6.1 对称三相电源 .....                        | 117        |
| 4.4 电阻元件的交流电路 .....           | 71         | 6.1.1 对称三相电压的产生 .....                   | 117        |
| 4.4.1 电阻元件的欧姆定律 .....         | 71         | 6.1.2 三相电源的联结 .....                     | 119        |
| 4.4.2 电阻元件的功率 .....           | 72         | 6.2 三相电路的供电方式 .....                     | 120        |
| 4.5 电容元件的交流电路 .....           | 73         | 6.2.1 Y-Y联结的三相电路 .....                  | 120        |
| 4.5.1 电容元件的欧姆定律 .....         | 73         | 6.2.2 $\Delta$ - $\Delta$ 联结的三相电路 ..... | 121        |
| 4.5.2 电容元件的功率 .....           | 74         | 6.3 对称三相电路的分析 .....                     | 121        |
| 4.5.3 电容元件的应用 .....           | 76         | 6.3.1 三相负载的星形联结 .....                   | 122        |
| 4.6 电感元件的交流电路 .....           | 78         | 6.3.2 三相负载的三角形联结 .....                  | 124        |
| 4.6.1 电感元件的欧姆定律 .....         | 78         | 6.4 三相电路的功率及其测量 .....                   | 125        |
| 4.6.2 电感元件的功率 .....           | 79         | 6.4.1 三相电路的功率 .....                     | 125        |
| 4.6.3 电感元件的应用 .....           | 81         | 6.4.2 三相功率的测量 .....                     | 126        |
| 本章小结 .....                    | 82         | 本章小结 .....                              | 128        |
| 练习题 .....                     | 83         | 练习题 .....                               | 128        |
| <b>第5章 RLC 串并联电路的分析 .....</b> | <b>85</b>  | <b>第7章 变压器 .....</b>                    | <b>130</b> |
| 5.1 交流电路的等效阻抗 .....           | 85         | 7.1 线圈的互感 .....                         | 130        |
| 5.1.1 相同元件的串联 .....           | 85         | 7.2 基本变压器 .....                         | 130        |
| 5.1.2 不同元件的串联 .....           | 85         | 7.2.1 变压器的结构 .....                      | 131        |
| 5.1.3 阻抗的并联 .....             | 86         | 7.2.2 变压器绕组的极性 .....                    | 131        |
| 5.2 RC 交流电路的分析 .....          | 87         | 7.3 变压器的工作原理 .....                      | 132        |
| 5.2.1 RC 串联电路 .....           | 87         | 7.3.1 电压变换 .....                        | 133        |
| 5.2.2 RC 并联电路 .....           | 91         | 7.3.2 电流变换 .....                        | 133        |
| 5.2.3 RC 电路的功率 .....          | 92         | 7.3.3 负载变换 .....                        | 134        |
| 5.2.4 RC 串联电路的应用 .....        | 93         | 7.3.4 阻抗匹配 .....                        | 135        |
| 5.2.5 RC 电路的频率选择性 .....       | 95         | 7.4 变压器的额定值 .....                       | 136        |
| 5.3 RL 交流电路的分析 .....          | 97         | 7.5 变压器的损耗与效率 .....                     | 136        |
| 5.3.1 RL 串联电路 .....           | 97         | 7.6 其他类型的变压器 .....                      | 137        |
| 5.3.2 RL 串联电路的功率 .....        | 100        | 7.6.1 抽头变压器 .....                       | 137        |
| 5.4 RLC 串联电路与谐振 .....         | 101        | 7.6.2 多绕组变压器 .....                      | 137        |
| 5.4.1 RLC 串联电路的特性 .....       | 101        | 7.6.3 自耦变压器 .....                       | 138        |
| 5.4.2 串联谐振 .....              | 104        | 7.6.4 电流互感器 .....                       | 138        |
| 5.5 交流电流和交流功率的测量 .....        | 105        | 7.6.5 电压互感器 .....                       | 139        |
| 5.5.1 钳形表的使用 .....            | 105        | 本章小结 .....                              | 139        |
| 5.5.2 功率表的使用 .....            | 107        | 练习题 .....                               | 140        |
| 5.5.3 功率因数表的使用 .....          | 108        | <b>第8章 电路的暂态分析 .....</b>                | <b>142</b> |
| 5.6 功率因数的提高 .....             | 108        | 8.1 储能元件和换路定则 .....                     | 142        |
| 本章小结 .....                    | 110        | 8.1.1 储能元件 .....                        | 142        |
| 练习题 .....                     | 112        | 8.1.2 换路定则 .....                        | 143        |
| <b>第6章 三相电路 .....</b>         | <b>117</b> | 8.2 RC 电路的响应 .....                      | 144        |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 8.2.1 | RC 电路的零输入响应     | 144 |
| 8.2.2 | RC 电路的零状态响应     | 145 |
| 8.2.3 | RC 电路的全响应       | 145 |
| 8.3   | 微分电路和积分电路       | 146 |
| 8.3.1 | 微分电路            | 146 |
| 8.3.2 | 积分电路            | 147 |
| 8.4   | RL 电路的响应        | 147 |
| 8.5   | 一阶线性电路暂态分析的三要素法 | 147 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 本章小结                          | 149        |
| 练习题                           | 149        |
| <b>附录 EWB 计算机仿真实验</b>         | <b>151</b> |
| 附录 A Electronics WorkBench 简介 | 151        |
| 附录 B EWB 的基本界面                | 151        |
| 附录 C EWB 的基本操作                | 156        |
| <b>电工及电气测量技术课程要点</b>          | <b>162</b> |
| <b>参考文献</b>                   | <b>163</b> |

# 第 1 章

## 电路的基本概念和基本定律

“电”究竟是什么？很难抓住这一问题的实质。但电的各种作用可用电流和电压来说明。

本章先从身边的手电筒着手，追究一下电流的路径和它的源。为了表示电流的路径，就必须使用电路。电流是在电压作用下产生的。电流和电压虽然不能直接用肉眼看，但是可以用电流表和电压表来测量。电压和电流的关系由欧姆定律表达，欧姆定律在电路计算方面是很重要的基本定律。

### 1.1 电路的组成与电路中的物理量

大家都使用过手电筒，装上电池，合上开关，手电筒就会亮。

现在我们把手电筒里与发光有关的部件取出来看一下。手电筒的内部结构如图 1-1 所示。

手电筒是由电池、灯泡、开关等部件组成的，这些部件组成了一个简单的电路，其中对发光起作用的主要部件的作用如表 1-1 所示。

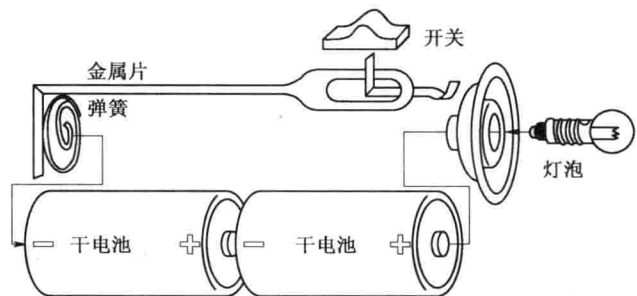


图 1-1 手电筒的内部结构

表 1-1 各主要部件的作用

| 部 件 | 作 用            | 类 比 |
|-----|----------------|-----|
| 电池  | 用于产生电流使灯泡发光的电源 | 水源  |
| 灯泡  | 负载，电流通过时发光     | 水车  |
| 金属片 | 用于连接灯泡和电池的电流通路 | 水管  |
| 开关  | 控制点亮和熄灭灯泡      | 阀门  |

为了研究各类具体电路，常忽略次要因素，只考虑主要部件构成的电路，这种电路称为实际电路的电路模型。

#### 1.1.1 电流

电池和灯泡用导线连接，导线中间接入开关，合上手电筒的开关灯泡就发光，关断开关灯就熄灭。和水车靠水流而转动相同，灯泡点亮也是靠某种“流”的作用，这种流称为电



流。灯泡之所以发光是由于电流通过的缘故，这种依靠电流通过而发光的作用称为电流发光效应。

电流根据其随时间的变化情况可以分为直流和交流。大小和方向不随时间而变化的电流称为直流，用大写字母  $I$  表示；大小和方向随时间而变化的电流称为交流，用小写字母  $i$  表示，其中电流的大小和时间按照正弦波的规律变化的电流称为正弦交流电。电流的单位为安培(A)。

用安培作为电流单位太大时，就用毫安 (mA) 或者微安 ( $\mu\text{A}$ )，它们之间的换算关系如下：

$$1\text{A} = 1000\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

手电筒灯泡中通有电流时发光，但是手电筒中不只是灯泡中有电流。电流从电池“+”极（阳极）流出，经过灯泡、开关再回到电池“-”极（阴极），这样，从阳极流出的电流必定流回到阴极，如果中途导线或者开关断开，电流将不通。电流的通路必定是转一圈的闭合环路。因此，把电流流通的路径称为电路。电路由使电流流通的电源、使电流的作用转变成光和热等各种效应的负载、连接电源和负载的导线以及起调节负载作用的调节器组成，如图 1-2 所示。

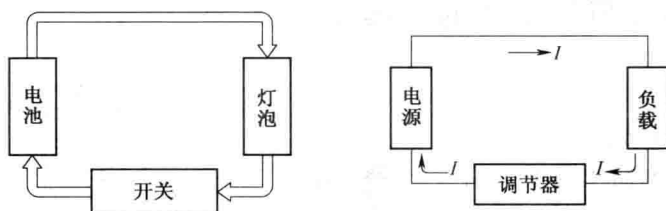


图 1-2 电路的组成

电路可以用电器的原型来表示，但是画起来太麻烦，所以使用图形符号（见表 1-2）来表示。通常图形符号要和文字符号结合在一起使用。

表 1-2 电路常用图形符号

| 名称   | 图符号 |
|------|-----|
| 直流电源 |     |
| 交流电源 |     |
| 灯    |     |
| 电阻   |     |
| 开关   |     |
| 电流表  |     |
| 电压表  |     |

### 1.1.2 电压

下面我们将电压问题和水压进行类比，如图 1-3 所示。水从高处流向低处，即两点间有水压时，水就流动。按照同样的思路来考虑电流，可以认为电流是在电气压力作用下产生的，这一压力就称为电压。电流从电压高的点流向电压低的点。因为电流靠电压作用，所以电压为零时没有电流。

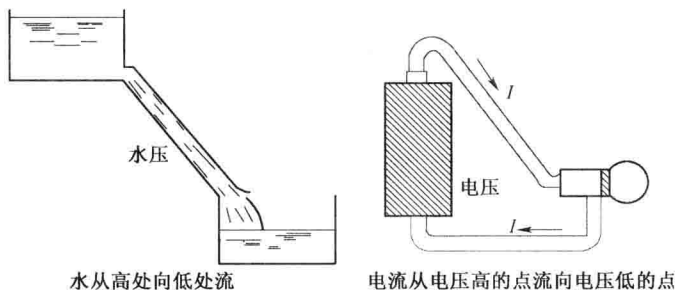


图 1-3 电压问题和水压进行类比

同样电压也有直流电压和交流电压之分。大小和方向不随时间而变化的电压称为直流电压，用大写字母  $U$  表示；大小和方向随时间而变化的电压称为交流电压，用小写字母  $u$  表示，其中电压的大小和时间按照正弦波的规律变化的电压称为正弦交流电压。电压的单位为伏特 (V) (简称伏)，用伏作为电压单位太大时，就用毫伏 (mV)；用伏作为电压单位太小时，就用千伏 (kV)。它们之间的换算关系如下：

$$1\text{V} = 1000\text{mV}$$

$$1\text{V} = 10^{-3}\text{kV}$$

### 1.1.3 电动势

如图 1-4 所示，为了使水从屋顶水箱一直流向各家各户，需要用水泵将下面的水打到屋顶水箱。同样，在电路中使电流能够持续循环流动的是电源。电源有持续产生电压的能力，电源内部产生的电压称为电动势  $E$ 。单位也为伏特 (V)。有时电源的电动势也用电源的端电压来表示。

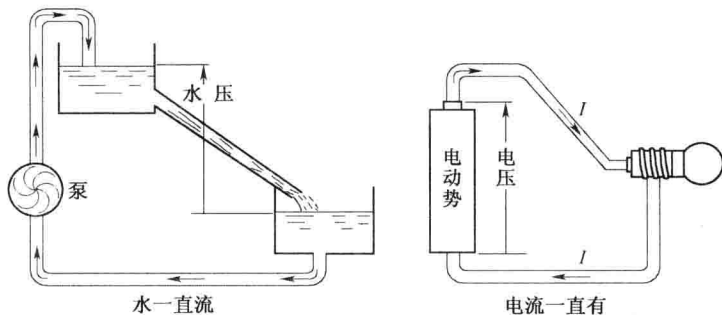


图 1-4 电动势和水泵的类比

### 1.1.4 电位

如图 1-5 所示，将测量点距基准点水的高度称为水位，两点间水位的差称为水位差。类似的情况，先选取电路的基准点（或称参考点），电路中各点相对于参考点的电压就称为电位，用大写字母  $V$  表示，单位也为伏特（V）。

**【例 1.1】** 如图 1-5b 所示，将三个具有 1.5V 电动势的电池叠加起来，问 a、b、c 各点的电位各为多少伏？

**解：**先设定一个基准点（参考点），取该点为 0V（一般以大地为 0V），各点对基准点的电压称为电位。

因此，a、b、c 各点的电位分别为

$$\text{a 点: } 1.5\text{V} \quad \text{b 点: } 3.0\text{V} \quad \text{c 点: } 4.5\text{V}$$

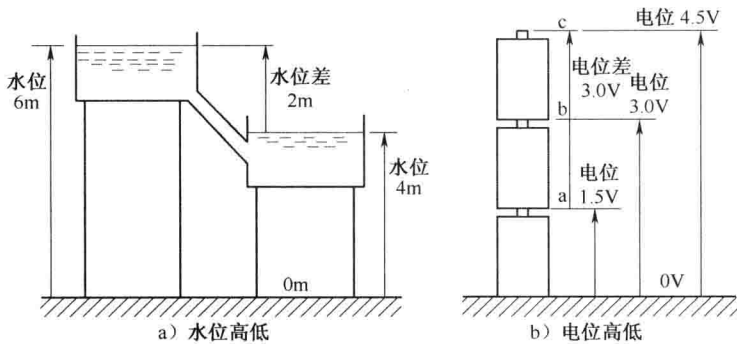


图 1-5 电位和电位差与水位和水位差的类比

电位是对基准点的电压，任意两点间电位的差值称为电位差，也就是两点间的电压。取大地为基准点时，电位为

$$\text{a 点: } V_a = 1.5\text{V} \quad \text{b 点: } V_b = 3\text{V} \quad \text{c 点: } V_c = 4.5\text{V}$$

$$\text{ab 两点间的电压为} \quad 1.5\text{V} - 3\text{V} = -1.5\text{V}$$

$$\text{bc 两点间的电压为} \quad 3\text{V} - 4.5\text{V} = -1.5\text{V}$$

如果选取 b 点为基准点，则 a、b、c 各点的电位分别为

$$\text{a 点: } V_a = -1.5\text{V} \quad \text{b 点: } V_b = 0\text{V} \quad \text{c 点: } V_c = 1.5\text{V}$$

$$\text{ab 两点间的电压为} \quad U_{ab} = -1.5\text{V} - 0\text{V} = -1.5\text{V}$$

$$\text{bc 两点间的电压为} \quad U_{bc} = 0\text{V} - 1.5\text{V} = -1.5\text{V}$$

大家知道这时图中大地的电位是多少吗？

从上面的例子可以看出：

1) 当基准点（参考点）改变时，各点电位值跟着改变，而两点之间的电压值是不变的。因此，电位值是相对的，电压值是绝对的。

2) 两点间的电压等于两点电位的差，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \tag{1-1}$$

## 1.2 电流和电压的方向

在单回路的直流电路中，如果知道电池的电动势的方向，那么很容易看出电路中电流流

动的方向。电流的方向是客观存在的，它总是从电位高的地方流向电位低的地方。但是，在分析两个及以上回路的复杂电路时，却很难立即判断出电流在整个回路中的流动方向。

因此，在分析与计算复杂的电路时，常常先任意选定某一方向作为电流的参考方向，所选的参考方向并不一定与实际电流的方向相同。经过计算，如果电流的数值为正值，则说明选定的参考方向与电流的实际方向一致；如果计算的电流数值为负值，则选定的参考方向与电流的实际方向相反。

电流方向有两种表示方法：双下标法（如  $I_{ab}$ ）和箭头法，如图 1-6 所示，通常用箭头法比较直观。



图 1-6 电流方向表示法

电压的实际方向规定为由高电位点指向低电位点。同样，电压也可以任意选定其参考方向，一般来说，在电路中，先选定电流的参考方向，然后将电压的参考方向和电流的参考方向选取成一致，这称为关联参考方向。



图 1-7 电压方向表示法

电压方向也有两种表示方法：双下标法和双极性法，如图 1-7 所示。通常用双极性法比较直观。

### 1.3 电流和电压的测量方法

测量分为直接测量和间接测量。用指示仪表或数字仪表进行直接测量电压或电流等电量称为直接测量。使用合适的准确度等级，并运用正确的测量方法，可以使直接测量的结果的误差达到最小。间接测量是通过仪表测量出电流、电压等电量，再通过计算得到结果；或者是通过中间量的测量再得到测量结果。

测量时都要用到电工仪表，电工仪表按大类分为模拟指示类仪表、数字仪表和比较仪器等。用电磁原理测量各种电磁量的仪器仪表称为电测量仪表。电工仪表不仅可以测量电磁量，而且可以测量非电磁量，例如温度、压力和速度等。

(1) 模拟指示仪表 它是将被测电磁量转换为可动部分的角位移，然后根据可动部分的指针在标尺上的位置直接读出被测量的数值。测量读数也可能用液晶显示或数字转盘等进行。模拟指示仪表按不同方法分类：

1) 按被测对象分：可分为交直流电压表、电流表、功率表、频率表、相位表、电能表以及各种参数测量仪。

2) 按工作原理分：可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系和静电系等。

3) 按防护性能分：可分为普通、防尘、防溅、防水、隔爆、水密、气密以及防御电磁影响等。

4) 按读数装置分：可分为指针式、光指示式、振簧式和数字转盘式等。

5) 按使用方式分：可分为固定安装式、可携式等。

6) 按准确度等级分：可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七个等级。

(2) 数字仪表 它是将被测量转换成数字量，并以数字形式显示出被测量的数值。由

于采用数字技术，因此很容易与微处理器配合，能实现自动选择量程，自动存储测量结果，自动进行数据处理及自动补偿等功能。数字式仪表不需要进行读数换算，可以直接读出数值，使用方便，但是不易看出变化趋势。目前大多使用数字仪表。

(3) 比较仪器 用比较法测量得到测量结果，测量准确度比较高。如交直流电桥、检流仪等。

常用电工仪表外形如图 1-8 所示。

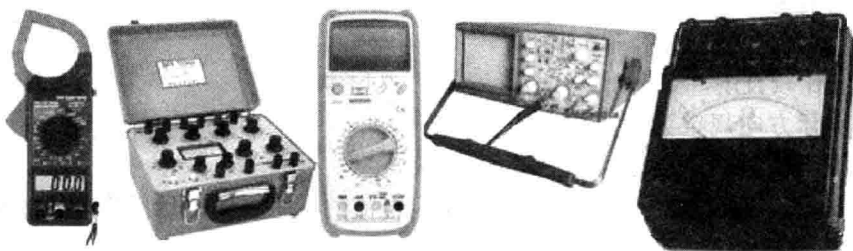


图 1-8 常用电工仪表外形图

## 1.3.1 电流的测量

根据灯泡的亮度在一定程度上可知道通过灯泡的电流的大小，电流太大时会烧坏灯泡，太小时灯泡不亮。为了确切测量电流的大小，一般使用电流表直接测量。测量直流电流使用直流电流表，测量交流电流使用交流电流表。

用电流表测量电路中的电流时，要断开被测电路的测量处，把电流表串联接入电路，如图 1-9 所示。按照这样连接电流表时，电路中的电流将原封不动地通过电流表，这种接线方法称为串联连接。

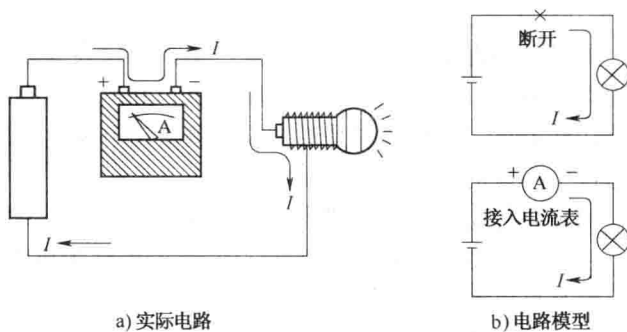


图 1-9 电流表连接方法

测量电流时需要考虑电流的方向，接线前，先选择电流表的种类和量程，然后按照电流流入红色表笔（+接线柱）、流出黑色表笔（-接线柱）的原则进行连接。

## 1.3.2 电压的测量

为了准确测量两点间的电压，需要使用电压表。同样，测量直流电压使用直流电压表，测量交流电压使用交流电压表。电压表和电流表的外形有些相似，但是电流表的表盘上标有符号“A”，而电压表的表盘上标有符号“V”。

用电压表测量电压时，不需要像接电流表那样断开被测电路。测量两点间的电压时，只需要把电压表的红色表笔（+接线柱）接到待测电压的正端、黑色表笔（-接线柱）接到待测电压的负端，如图 1-10 所示，这种连接方法称为与被测电路并联连接。

同样,在测量前,要先选择电压表的种类和量程。

### 1.3.3 测量误差

工程上的任何测量都将不可避免地产生误差。在误差理论中,准确度用来表征系统误差的大小程度。系统误差愈大,准确度就愈低;精密度用来表征偶然误差的大小,测量的准确度较高,不一定精密度也高;精确度是指系统误差和偶然误差的综合结果,如精确度很高,则指系统误差和偶然误差均很小。下面主要讨论测量误差。

测量误差有三种表示方法:

#### 1. 绝对误差

用测量值  $A_x$  与被测量真值  $A_0$  之间的差值所表示的误差称为绝对误差  $\Delta$ 。

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

绝对误差的单位与被测量的单位相同,误差可能为正,也可能为负,例如测量 10V 电压,实测两次,一次为 10.02V,另一次为 9.99V,则第一次的绝对误差为  $10.02\text{V} - 10\text{V} = +0.02\text{V}$ ,第二次的绝对误差为  $9.99\text{V} - 10\text{V} = -0.01\text{V}$ 。

#### 2. 相对误差

绝对误差  $\Delta$  与被测量真值  $A_0$  之比,称为相对误差,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

绝对误差比较直观,相对误差则可以确切地衡量误差对测量结果造成的影响,即相对误差更加确切地反映测量结果的准确程度。

**【例 1.2】** 用一电压表测量 200V 的电压,其绝对误差为 +1V,用另一电压表测量 20V 时,绝对误差为 +0.5V,求它们的相对误差。

解:

$$\gamma_1 = \frac{\Delta}{A_{x1}} \times 100\% = \frac{1}{200} \times 100\% = +0.5\%$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta}{A_{x2}} \times 100\% = \frac{0.5}{20} \times 100\% = +2.5\%$$

测量 200V 时的绝对误差 1V 比测量 20V 时的 0.5V 大,但是其相对误差 ( $+0.5\% < +2.5\%$ ) 反而小,说明测量结果的准确程度要用相对误差表示才能更确切地反映其准确性。

**【例 1.3】** 用电压表测量实际值为 220V 的电压,其测量相对误差为 -4%,试求测量的绝对误差和电压表读数。

解:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \rightarrow \Delta = \gamma \times A_0 = -4\% \times 220\text{V} = -8.8\text{V}$$

$$A_x = A_0 + \Delta = 220\text{V} - 8.8\text{V} = 211.2\text{V}$$

已知实际值和测量的相对误差,即可求出绝对误差,用实际值加上绝对误差就是仪表的测量值。

#### 3. 引用误差

以绝对误差  $\Delta$  与仪表上限  $A_m$  的比值表示的误差称为引用误差,用  $\gamma_n$  表示:

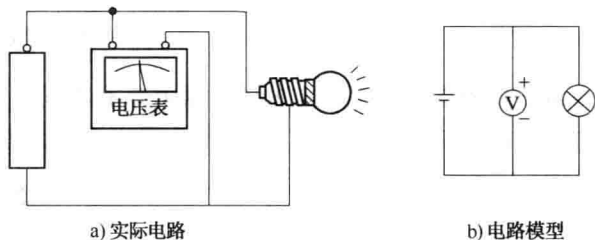


图 1-10 电压表的连接方法

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

由于仪表在不同刻度点的绝对误差略有不同，因此取可能出现的最大绝对误差  $\Delta_m$  与仪表的上量限（满刻度值） $A_m$  之比称为最大引用误差，即

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

**【例 1.4】** 测量 95V 的电压，实验室有 0.5 级 0 ~ 300V 量程和 1.0 级 0 ~ 100V 量程两块仪表，为能使测量尽可能准确，应选用哪一块仪表？

**解：**用 0.5 级 0 ~ 300V 量程的仪表测试： $\Delta_1 = 0.5\% \times 300V = 1.5V$

$$\gamma_1 = \frac{1.5}{95} \times 100\% = 1.6\%$$

用 1.0 级 0 ~ 100V 量程的仪表测试： $\Delta_2 = 1.0\% \times 100V = 1.0V$

$$\gamma_2 = \frac{1.0}{95} \times 100\% = 1.05\%$$

因为  $\gamma_2 \leq \gamma_1$ ，所以选用 1.0 级 0 ~ 100V 量程仪表更为准确。

仪表的准确度与仪表本身结构有关，测量时相对误差随被测量的减小而逐渐增大，所以相对误差可以说明测量结果的准确度，但是不能说明仪表本身的优劣。最大引用误差中的量均为仪表本身所决定，所以用最大引用误差来评价仪表性能或者准确度是完全可以的。

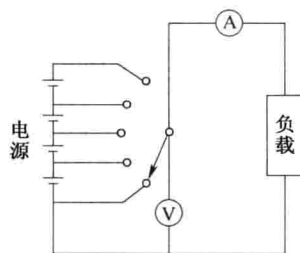
## 1.4 电阻和欧姆定律

1826 年，欧姆在试验中发现，在相同的电压作用下，并不是所有的物质都能通过相同的电流。有些物质通过的电流比其他物质要大些，比如：金属比木头更容易导电。用来表征物体导电能力的物理量称为电阻，用大写字母  $R$  表示，单位为欧姆 ( $\Omega$ )，电阻大时用千欧 ( $k\Omega$ )、兆欧 ( $M\Omega$ )，它们之间的换算关系为

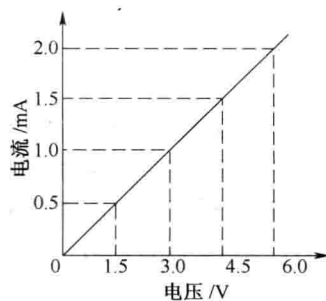
$$1M\Omega = 1000k\Omega = 10^6\Omega$$

导电能力强的物体电阻小，导电能力差的物体电阻大。那么，电阻、电压和电流之间到底具有一个什么样的关系呢？下面先来做一个实验。

给灯泡或者其他负载加上电压后，电路中产生电流，为了精确了解电压和电流的变化，在电路中串联一个直流电流表、并联一个直流电压表，如图 1-11a 所示。



a) 实验电路



b) 伏安特性

图 1-11 欧姆定律

假设负载保持不变，加在负载上的电压从 0 开始，每次升高 1.5V，测得的电流如表 1-3 所示。

表 1-3 欧姆定律的实验结果

|                   |   |     |     |     |     |
|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| 电压 $U/V$          | 0 | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 |
| 电流 $I/mA$         | 0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| $U/I = R/k\Omega$ | — | 3   | 3   | 3   | 3   |

实验结果表明：在负载不变的情况下，电压增至 2 倍，电流也增至 2 倍；电压增至 3 倍，电流也增至 3 倍；依此类推，当电阻不变时，电流与电压成正比。这就是电路中最重要定律——欧姆定律。可用数学表达式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad (1-6)$$

将实验数据用曲线图表示，就得到图 1-11b 中的直线，称为电阻的伏安特性曲线。

如果电路中电压和电流选择的参考方向不同，在欧姆定律的表达式中将会有正、负号之分：

|   |  |
|---|--|
| 电压的参考方向与电流的一致时<br>$U = IR$<br>如图 1-12a 所示 | 电压的参考方向与电流的相反时<br>$U = -IR$<br>如图 1-12b、c 所示 |
|---|--|

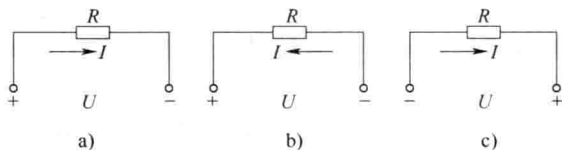


图 1-12 欧姆定律

【例 1.5】 已知  $R = 3\Omega$ ，应用欧姆定律对图 1-13 所示各电路分别列出式子，并求电流  $I$ 。

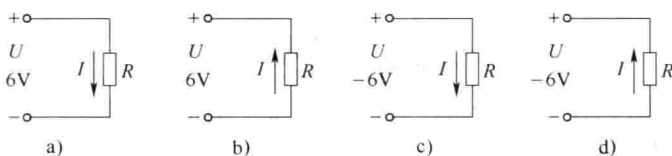


图 1-13 例 1.5 的电路

解：图 1-13a：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6V}{3\Omega} = 2A$$

图 1-13b：

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{6V}{3\Omega} = -2A$$

图 1-13c：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{-6V}{3\Omega} = -2A$$

图 1-13d：

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{-6V}{3\Omega} = 2A$$



**【例 1.6】** 计算图 1-14 所示电路在开关 S 闭合与断开两种情况下的电压  $U_{ab}$  和  $U_{cd}$ 。

**解：**开关 S 闭合时，电路形成闭合回路，在电源的作用下将有电流流过。我们先选定电流的参考方向，并在电路图上画出。

由于开关的电阻很小，可以忽略不计，则  $R_{ab} \approx 0$

电路的总电阻为

$$R = 0.5\Omega + 0\Omega + 5.5\Omega = 6\Omega$$

选定电压的方向与电流的方向一致，根据欧姆定律，电路中的电流  $I$  为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{6V}{6\Omega} = 1A$$

$$U_{ab} = IR_{ab} = 0V \quad U_{cd} = IR_{cd} = 1A \times 5.5\Omega = 5.5V$$

当开关 S 断开时，电路断开，这时电路处于开路状态，没有电流通过，电阻上的电压为 0。

$$U_{ab} = E = 6V \quad U_{cd} = IR_{cd} = 0A \times 5.5\Omega = 0V$$

如果用导线将图 1-14 所示电路中的 a、d 两点连接起来，由于导线的电阻很小，可以忽略不计，这时  $5.5\Omega$  的电阻就处于短路状态，没有电流通过。

实际的电源工作时都会发热，这就表明电源其实有电阻存在，称为电源的内阻，可以表示为电动势和内阻串联，如图 1-14 所示，可将  $0.5\Omega$  的电阻看成  $6V$  电源的内阻。这时如果 a、d 两点用导线连接起来，电源就处于短路状态，发出的电流最大，称为短路电流。

电源短路会产生严重后果，很大的短路电流容易烧坏线路或设备的绝缘，引起火灾等事故。通常在电路中接入熔断器或断路器，发生短路时，能迅速地自动切断故障电路。

**【例 1.7】** 用图 1-15 所示的直流电源、电表及电阻，构成测量流入电阻的电流以及电阻两端电压的电路图，并适当选择仪表的量程。

**解：**计算出电流的大小为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3V}{2000\Omega} = 0.0015A = 1.5mA$$

所以，选择电压表量程为  $5V$ 、电流表量程为  $3mA$  比较合适。

测量电路图如图 1-16 所示。

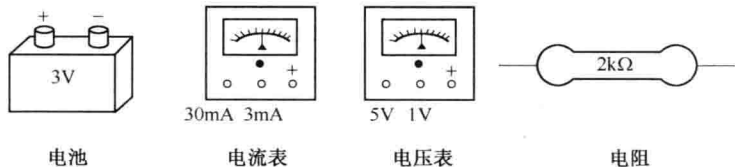


图 1-15 例 1.7 的电路

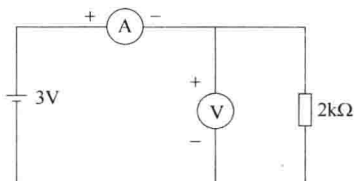


图 1-16 测量电路

**【例 1.8】** 在图 1-17 中，求出闭合开关 S 时的电流  $I$ ，然后求出开关 S 打开时的电流大小。