



“十三五”应用型人才培养规划教材

电工基础

(第2版)

王民权 主编

应力恒 梅晓妍 副主编

清华大学出版社

“十三五”应用型人才培养规划教材

电工基础 (第2版)

王民权 主 编
应力恒 梅晓妍 副主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书的主要内容包括：电路的组成及基本知识、电路的基本分析方法、单相正弦交流电路、三相正弦交流电路、磁路与变压器、三相交流异步电动机、三相异步电动机的典型电气控制电路7章。

本书的主要特色包括：知识学习精选教学案例，鼓励学生在模仿中举一反三、掌握分析问题的方法与步骤；应用技能以图形加表格的方式给出，便于直观理解和对比学习，部分操作内容通过图示逐步引导。

本书适合机电和化工类高职高专在校学生、成人教育及函授学生、企业电气工作技术人员阅读使用，本书配套有系统化设计的学习课件和智学苑网上课堂资源。

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

电工基础/王民权主编. —2版. —北京：清华大学出版社，2017(2018.10重印)

(“十三五”应用型人才培养规划教材)

ISBN 978-7-302-46267-5

I. ①电… II. ①王… III. ①电工—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 021118 号

责任编辑：田在儒

封面设计：牟兵营

责任校对：刘 静

责任印制：杨 艳

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>, 010-62770175-4278

印 装 者：三河市铭诚印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：19.25

字 数：438千字

版 次：2013年9月第1版 2017年7月第2版

印 次：2018年10月第4次印刷

定 价：39.80元

产品编号：073598-02

前言

FOREWORD

“电工基础”是一门电工类的技术基础课。课程内容涵盖电路元器件识别、电路物理量计算与测量、交直流电路分析、磁路与变压器、三相异步电动机、典型电动机电气控制电路等。通过电路知识的学习、典型电气控制电路的功能分析与装接练习,积累装接技能维修方法,为将来从事机电设备的电气维修奠定了良好的基础。

本书针对高职高专工科机电大类学生编写。作为一本面向高职高专学生的技术基础课教材,本书在知识传承的基础上注重应用能力的培养;在重视学生技能训练的同时,关注他们未来的可持续发展。在内容编排上,尽量做到工程应用的技能性与知识点的系统性相结合。

全书章节整体构架为“学习目标→学习指导→学习内容→知识应用”,同时又根据具体内容调整编写风格。如针对理论知识为主的“电路分析方法”,按“方法探索→方法学习→方法应用→总结提高”组织教材内容;针对应用技能为主的“典型电气控制电路”,则按“认识元件→电路组成→功能分析→电路装接→故障检查”安排学习进程。

本书把多年积累的教学案例有机地嵌入教材内容中。知识学习部分精选教学案例,给出案例目的,鼓励学生在模仿中举一反三、掌握分析问题的方法与步骤;应用技能部分以图形加表格的方式给出,便于直观地理解和对比学习,有些操作内容,做到了图示逐步引导。

本书建议学时为 72~80 学时,教师可根据专业特点和实训设备情况适当调整。

本书由宁波职业技术学院的王民权担任主编并负责统稿。教材的第 3~7 章由王民权编写,第 1 章由应力恒编写,第 2 章由梅晓妍编写。

在编写本书的过程中,参考了一些经典的本科教材和优秀的高职教材;采纳了出版社编辑的很多重要的意见和建议,在此一并表达真诚的感谢。

虽为呕心之作,但囿于作者水平,书中疏漏不妥之处恐难避免。恳请使用者不吝赐教,提出宝贵的修改意见,帮助它成为一本有生命力的好教材。

不积跬步,无以至千里。让我们从本书开始,踏上专业的学习之路。



本书介绍视频

编者

2017 年 1 月

目录

CONTENTS

第1章 电路的组成及基本知识	1
1.1 电路的组成与基本物理量	1
1.1.1 典型电路应用实例	1
1.1.2 电路的概念	2
1.1.3 电路中的物理量	4
1.2 认识电阻元件	10
1.2.1 电阻的种类与规格	10
1.2.2 电阻的作用	13
1.2.3 电阻的特性	13
1.2.4 电阻的基本使用	16
1.3 认识电容元件	17
1.3.1 电容的种类与规格	17
1.3.2 电容的结构与作用	20
1.3.3 电容的特性	21
1.3.4 电容的串并联	22
1.3.5 电容的基本使用	23
1.4 认识电感元件	25
1.4.1 电感的种类与规格	25
1.4.2 电感的结构与作用	27
1.4.3 电感的特性	27
1.4.4 电感的串并联	28
1.4.5 电感的基本使用	28
1.5 认识电源	30
1.5.1 电压源及其特性	31
1.5.2 电流源及其特性	32
1.6 电路物理量的测量	33

1.6.1	电流的测量	33
1.6.2	电压的测量	38
1.6.3	功率的测量	41
1.6.4	电能的测量	42
1.7	基尔霍夫定律的学习与应用	43
1.7.1	电路模型中的术语	44
1.7.2	基尔霍夫定律及其应用	44
	本章小结	47
	习题 1	49
第 2 章	电路的基本分析方法	52
2.1	电阻的联结与等效	52
2.1.1	实际问题	52
2.1.2	电阻的串联	53
2.1.3	电阻的并联	55
2.1.4	电阻的混联	58
2.1.5	电阻星形联结与三角形联结的等效变换	59
2.2	电源的等效变换与应用	62
2.2.1	方法探索	63
2.2.2	电源等效变换及其应用	63
2.3	支路电流法及其应用	67
2.3.1	方法探索	67
2.3.2	支路电流法及其应用	68
2.4	结点电位法及其应用	71
2.4.1	方法探索	72
2.4.2	结点电位法及其应用	72
2.5	叠加定理及其应用	75
2.5.1	方法探索	75
2.5.2	叠加定理及其应用	76
2.6	戴维宁定理及其应用	80
2.6.1	方法探索	80
2.6.2	戴维宁定理及其应用	80
*2.7	含有受控源电路的分析	85
	本章小结	89
	习题 2	91
第 3 章	单相正弦交流电路	96
3.1	正弦交流电的表示方法	96

3.1.1 正弦交流电的三要素	96
3.1.2 正弦交流电的表示方法	99
3.1.3 正弦交流电各种表示法的比较	104
3.2 单一参数电路的分析与计算	105
3.2.1 纯电阻电路	105
3.2.2 纯电容电路	107
3.2.3 纯电感电路	110
3.3 复合参数电路的分析与计算	113
3.3.1 RLC 串联电路	113
3.3.2 RLC 并联电路	118
3.3.3 RLC 混联电路	121
3.3.4 电路参数的测量	123
3.4 电路功率因数的提高	124
3.4.1 提高功率因数的意义	124
3.4.2 提高功率因数的方法	125
* 3.5 电路的谐振	127
3.5.1 串联谐振电路	127
3.5.2 并联谐振电路	129
本章小结	131
习题 3	134
第 4 章 三相正弦交流电路	136
4.1 三相交流电源的联结	136
4.1.1 三相对称交流电源	137
4.1.2 三相电源的星形(Y)联结	137
4.1.3 三相电源的三角形(Δ)联结	139
4.1.4 三相电源与负载的正确联结	140
4.2 三相负载的联结	141
4.2.1 三相负载的星形(Y)联结	142
4.2.2 三相负载的三角形(Δ)联结	145
4.3 三相电路功率的计算与测量	150
4.3.1 三相电路功率的计算	150
4.3.2 三相电路功率的测量	152
* 4.4 三相电路相序的判断	155
4.4.1 相序检测原理	155
4.4.2 相序检测装置的制作与使用	156
本章小结	157
习题 4	159

第5章 磁路与变压器	161
5.1 磁场与磁路定律	161
5.1.1 磁场	161
5.1.2 磁场的基本物理量	162
5.1.3 磁路与磁路基本定律	164
5.2 磁性材料及其应用	168
5.2.1 磁性材料的磁性能	168
5.2.2 铁磁性物质的应用	171
5.2.3 铁磁材料的充磁与退磁	172
5.3 直流电磁铁及其应用	174
5.3.1 起重电磁铁	174
5.3.2 电机的磁极	175
5.3.3 各类电磁继电器	175
*5.4 交流电磁铁	177
5.4.1 交流电磁铁的电磁关系	178
5.4.2 交流电磁铁的磁力关系	179
*5.4.3 交流电磁铁的损耗	181
5.5 变压器	182
5.5.1 控制变压器	182
5.5.2 三相电力变压器	187
5.5.3 自耦调压器	188
5.5.4 其他变压器	189
本章小结	190
习题5	191
第6章 三相交流异步电动机	193
6.1 电动机的结构与铭牌	193
6.1.1 定子的结构与作用	194
6.1.2 转子的结构与作用	195
6.1.3 铭牌与接线	196
6.2 电动机的工作原理	199
6.2.1 定子旋转磁场的产生	199
6.2.2 定子旋转磁场的速度	200
6.2.3 转子旋转原理	202
6.2.4 转子的转速与转差率	203
6.3 电动机的机械特性	204
6.3.1 电动机的机械特性	204

6.3.2	负载的机械特性	207
6.3.3	电动机的运行特性	208
*6.3.4	电动机的功率关系	209
6.4	电动机的起动、调速、反转和制动	210
6.4.1	电动机的起动	211
6.4.2	电动机调速	216
6.4.3	电动机反转	218
6.4.4	电动机制动	218
*6.5	机电设备配套电动机的选择	219
6.5.1	电动机选择的一般原则	220
6.5.2	水泵配套电动机的选择	221
6.5.3	带式运输机配套电动机的选择	222
	本章小结	223
	习题 6	226
第 7 章	三相异步电动机的典型电气控制电路	228
7.1	常用低压电器	229
7.1.1	低压断路器	229
7.1.2	熔断器	232
7.1.3	按钮	233
7.1.4	交流接触器	234
7.1.5	热继电器	236
*7.1.6	接线端子排	237
7.2	三相异步电动机单向运行的电气控制	240
7.2.1	电路组成与功能分析	241
7.2.2	电路装接	242
7.2.3	电路检查	244
*7.2.4	具有点动功能的单向运行电气控制电路	248
*7.2.5	能够两地操作的单向运行电气控制电路	249
7.3	三相异步电动机双向运行的电气控制	251
7.3.1	电路组成与功能分析	251
7.3.2	电路装接	252
7.3.3	电路检查	254
7.3.4	机械电气双重互锁的双向运行控制电路	257
*7.3.5	能自动往复的双向运行控制电路	258
7.4	三相异步电动机 Y- Δ 起动运行的电气控制	261
7.4.1	时间继电器	261
7.4.2	电路组成与功能分析	262

7.4.3 电路装接与检查	263
7.5 三相异步电动机双速运行的电气控制	264
7.5.1 电路组成与功能分析	264
7.5.2 元件接线图	266
7.6 绕线式异步电动机转子串电阻起动的电气控制	267
7.6.1 欠电流继电器	267
7.6.2 中间继电器	267
7.6.3 电路组成与功能分析	268
7.6.4 元件接线图	269
7.7 三相异步电动机反接制动的电气控制	270
7.7.1 倒顺开关	271
7.7.2 速度继电器	271
7.7.3 电路组成与功能分析	272
7.7.4 元件接线图	273
7.8 电动机顺序运行电气控制电路的设计与实施	273
7.8.1 工程问题	274
7.8.2 电气控制原理图设计	274
7.8.3 元件接线图设计	276
7.8.4 电器元件选择	276
*7.8.5 电路装接与调试	278
本章小结	279
习题7	281
附录	283
附录A 常见电阻特点及用途	283
附录B 色环的含义	283
附录C 常见电容	284
附录D 常见电感	284
附录E 防护等级	285
附录F Y系列三相异步电动机型号选择表	286
附录G 习题答案	289
参考文献	295

电路的组成及基本知识

1.1 电路的组成与基本物理量

【学习目标】

- 熟悉电路的组成及电路的三种工作状态。
- 掌握电路中常见物理量的定义、单位。
- 掌握电路元件中电压和电流的参考方向。

【学习指导】

电路物理量是本节的学习重点。不积跬步，无以至千里。下面就从电路的物理量和电路的基本定律开始，学习电工的基本知识和技能。

在高中物理的学习中，已了解简单直流电路中电压、电流、功率的定义、单位及基本运算方法。本节讲述的电压和电流，不仅要考虑其大小，更要关注其方向。此外，电路元件中电压、电流的大小和方向决定了该元件在电路中所起的作用。最后，可通过比较电压与电位的异同，掌握电位的概念。

在学习过程中能注意到这些问题，将有利于后续电路基本定律、电路分析方法的学习。

目前正处在一个高速发展的信息时代。人们每天都在使用各种各样的电子产品和设备，每天都在跟电路打交道。中学的物理课本中已有一些关于电路的概念和实验，如果大家有些淡忘或者是第一次接触电路，通过一些身边的例子可帮助大家掌握基本的概念，对电路的应用有一个初步的印象，以便为以后的学习打下坚实的基础。

1.1.1 典型电路应用实例

1. 最简单的电路

首先，通过一个简单的例子对电路产生一些感性的认识，如图 1-1-1 所示。家里的一个简单的电灯电路包括了灯泡、开关和电源。这三者组成了最简单的电路，对这个电路操



教学视频

作的效果就是电灯的亮和灭。人们每天开灯、关灯的动作就是在操作一个最简单的电路。由此可见,电路在生活中无处不在。

2. 家庭电路

在生活和生产的很多方面都用到单相交流电,家庭电路就是其中的一个应用。家庭电路由配电和用电两部分组成,如图 1-1-2 所示。上面谈到的最简单电路,实际就是家庭电路中的一个分支。家庭电路的用电部分由若干这样的用电分支构成,而这些用电分支的电分配取决于进户线之后的配电部分。所以,人们看到的家庭电路是由进户线、导线、开关、配电箱、插座、用电器等构成的。

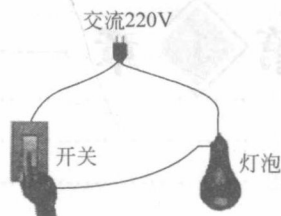


图 1-1-1 最简单的电路

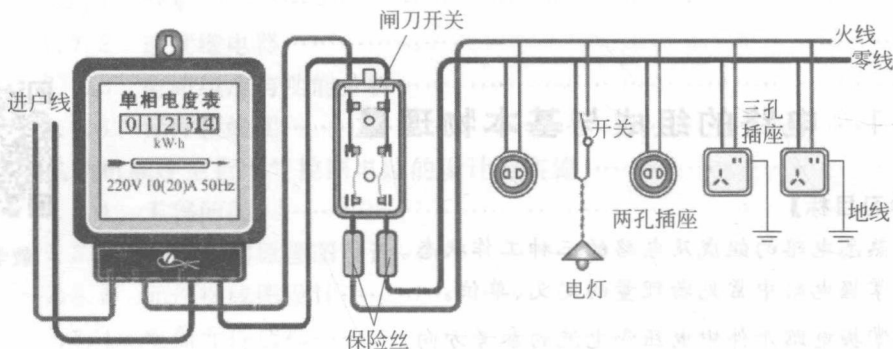


图 1-1-2 家庭电路

3. 电力系统供电电路

电力系统供电电路是三相电路。整个供电系统的应用电路如图 1-1-3 所示,供电系统由发电厂、电能输送线路、变配电站、用电单位等构成。发电厂中的发电机发出的电能通过变压器、输电线等送到用电单位,并通过负载将电能转换成其他形式的能量(如热能、机械能)。

通过前面的电路实例,大家一定能对电路有一个比较清晰的认识,概括如下:

- (1) 一个最简单的电路应该包括电源、用电器、导线和开关。
- (2) 电路完成特定的功能,主要通过电能的传输、分配与转换。

1.1.2 电路的概念

1. 电路的组成

根据以上认识,给出电路的定义:实际电路是由输电导线、电气设备、用电元件组成的,为完成某种预期的目的而设计、连接和安装形成的电流通路,一般由电源(供应电能的设备,把其他形式的能量转换为电能,如发电机)、负载(使用电能的设备,把电能转换为其他形式的能量,如电动机)、控制装置(根据负载的需要,起分配电能和控制电路的作用,如控制开关)和导线(连接各组成部分,提供电流通路)组成。



图 1-1-3 电力系统供电电路

2. 电路图

用规定的理想元件符号表示实际元器件的元件互连图,称为电路图。图 1-1-4 是手电筒电路转换而得的最简单电路图。

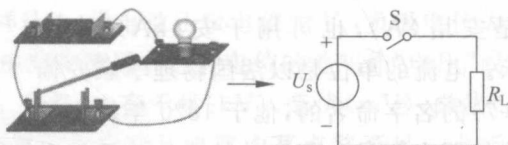


图 1-1-4 最简单的电路图

3. 电路的工作状态

大家都知道,操作图 1-1-1 中所示的开关能实现电灯的亮和灭。亮,意味着电路中有电流经过;灭,意味着电路中没有电流。要在一段电路中产生电流,必须有电荷的定向移动。电压能使电荷发生定向移动,电源则是提供电压的装置。

根据电路中电流的有无,电路一般具备三种工作状态:通路、开路和短路,如图 1-1-5 所示。通路是有完整电流通路路径的电路,如图 1-1-5(a)所示。开路是没有电流的电路,如图 1-1-5(b)所示。若电路中某一部分的两端被电阻值接近于零的导体连接在一起,电路则呈短路状态,如图 1-1-5(c)所示。

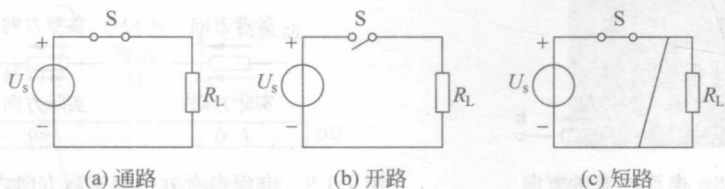


图 1-1-5 电路的三种工作状态

1.1.3 电路中的物理量

1. 电流

前面提到电灯的亮和灭意味着电路中是否有电流。电流的形成取决于带电粒子有规则的定向运动。带电粒子开始流动时,立刻在导体中产生影响,如同撞球间力量的传送,如图 1-1-6 所示。电流实际上是带电粒子在改变其运行轨道时,将自身所带的电能传送给另一个带电粒子,每个带电粒子重复这个动作,并使该过程在导体中持续。

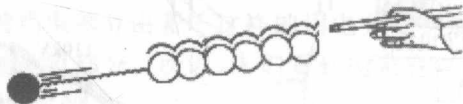


图 1-1-6 撞球间力量的传送

(1) 电流强度

表征电流强弱的物理量是电流强度,用 i 表示,即单位时间内通过导体横截面的电荷量,即 $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$,用微分的形式表示为 $i = \frac{dq}{dt}$ 。式中, dq 为 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

在直流电路中,单位时间内通过导体横截面的电荷恒定不变,有 $I = \frac{Q}{t}$ 。

(2) 电流的单位

电流强度的单位是安培(A),也可用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等表示。电流的单位是以法国物理学家安德烈·玛丽·安培(图 1-1-7)的名字命名的,他于 1820 年提出了电磁理论,是第一个构建仪器来测量电荷流动的人。为了纪念他,人们将“安培”作为电流的单位。



图 1-1-7 物理学家安培

(3) 电流的方向

习惯上将正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。在分析电路时,复杂电路中某一段电路电流的实际方向有时很难确定,为此,引入参考方向这一概念。

电流的参考方向可以任意选定,如图 1-1-8 所示。无下标 I 的箭头指向即为电流的参考方向;含双下标的 I_{ab} 表示电流的参考方向由 a 指向 b 。

当选定的电流参考方向与实际方向一致时,电流为正值($I > 0$);当选定的电流参考方向与实际方向不一致时,电流为负值($I < 0$),如图 1-1-9 所示。

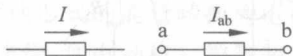


图 1-1-8 电流的参考方向

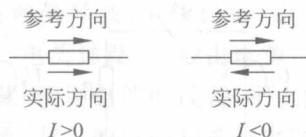


图 1-1-9 电流参考方向 and 实际方向之间的关系

2. 电压与电位

电压和电位的本质是相同的。通过图 1-1-10, 大家可以形象地了解电压和电位。

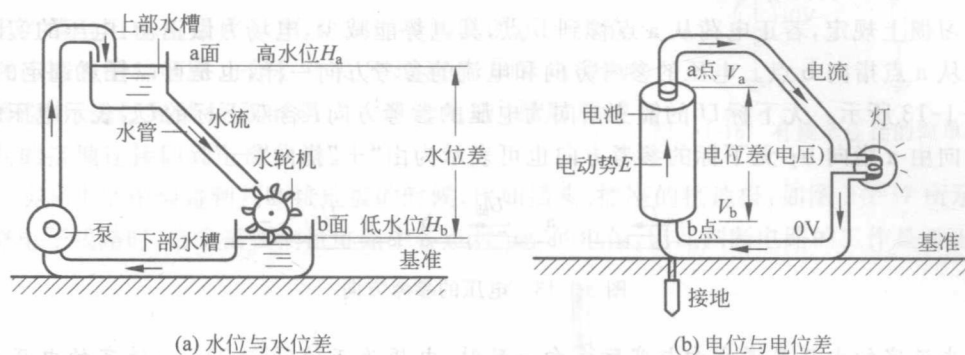


图 1-1-10 电压与电位的本质

(1) 电位

水在重力作用下从高处向低处流动, 水位越高, 水所具有的位能越高, 使水流动的压力越大。电的情形相同。相对于某一基准的电位能是电位, 即在电路中任选一点作为参考点(零参考点), 某点 a 到参考点的电位能就叫作 a 点的电位, 用 V_a 表示。电位的单位是伏(V)。

(2) 电压

对于电压, 可以这样认为, 设电池正极电位为 V_a , 负极电位为 V_b , 在电位差 $V_a - V_b$ 的作用下, 能够使电流在电路中流通。这种电位的差叫作“电压”或“电位差”, 单位和电位的单位相同, 都是伏(V)。当然, 也有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。有时, 也可以这样定义电压: 电场力将单位正电荷从电路中某点移至另一点所做功的大小, 用 u 表示, $u = \frac{dw}{dq}$ 。式中, dq 为由 a 点移到 b 点的电荷量, dw 为电荷移动过程中获得或失去的能量。在直流电路中, 单位时间内电场力将单位正电荷从电路中某点移至另一点所做的功恒定不变, 有 $U = \frac{W}{Q}$ 。图 1-1-11 所示为单位电荷在电场作用下的做功过程。

电压的单位是以意大利物理学家亚历山得罗·伏特(图 1-1-12)的名字命名的。他研

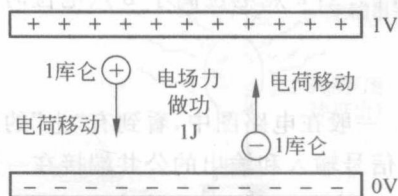


图 1-1-11 电场的做功能力

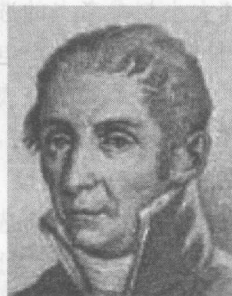


图 1-1-12 物理学家伏特

究了异金属之间的化学反应,于 1880 年发明了第一节电池。为了纪念他,人们将“伏特”作为电压的单位。

(3) 电压的方向

习惯上规定,若正电荷从 a 点移到 b 点,其电势能减少,电场力做正功,电压的实际方向就从 a 点指向 b 点。电压的参考方向和电流的参考方向一样,也是可以任意选定的,如图 1-1-13 所示。无下标 U 的箭头指向为电压的参考方向;含双下标的 U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 指向 b;无下标的参考方向也可表示为由“+”指向“-”。

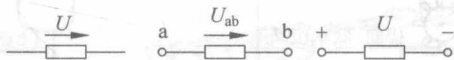


图 1-1-13 电压的参考方向

当选定的电压参考方向与实际方向一致时,电压为正值($U>0$);当选定的电压参考方向与实际方向不一致时,电压为负值($U<0$),如图 1-1-14 所示。

(4) 关于参考方向的几个说明

- ① 电流、电压的实际方向是客观存在的,而参考方向是人为选定的。
- ② 当电流、电压的参考方向与实际方向一致时,电压值、电流值取正号,反之取负号。
- ③ 分析计算每一个电流值、电压值时,要先选定其各自的参考方向,否则没有意义。

(5) 关联与非关联参考方向

如果指定流过元件的电流参考方向是从电压的“+”极指向“-”极,即两者采用一致的参考方向,称为关联参考方向;若两者采用的参考方向不一致,称为非关联参考方向,如图 1-1-15 所示。

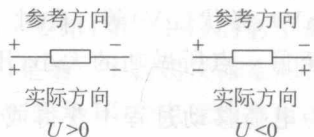


图 1-1-14 电压参考方向和实际方向之间的关系



(a) 关联参考方向 (b) 非关联参考方向

图 1-1-15 关联与非关联参考方向

(6) 电压与电位的关系

从前面的分析中可以看到,电压与电位的本质是相同的,但存在一定的区别。电位是相对的,其大小与参考点的选择有关;电压是不变的,其大小与参考点的选择无关。参考点的选择是任意的,但一个电路只能选择一个参考点。同时,对于前面提到的电压与电位的关系,可以用一个式子来表示,即 $U_{ab} = V_a - V_b$ 。当 a 点电位高于 b 点电位时, $U_{ab} > 0$; 当 a 点电位低于 b 点电位时, $U_{ab} < 0$ 。

(7) 实际电路中的电位

在分析电路时,通常要选择零参考电位点。一般在电路图中,看到有“⊥”的那一点就是零参考电位点。在电子电路中,一般把电源、信号输入和输出的公共端接在一起作为参考点。

工程上常选大地作为参考点。相对于电路中的其他点而言,接地点电压为 0V 。在一个电路中,所有接地点具有相同的零电位特性,因而是公共点。接地点与接地点之间可以看成是由导体连在一起的零电阻电流通路。图 1-1-16 举例说明了一个有接地连接的简单电路。合上开关 S , 电流从 10V 电源的正极流出, 经过导线流到电阻 R_L , 通过电阻, 最后通过公共的接地连接回到电源负极。

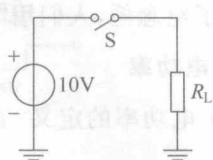


图 1-1-16 有接地连接的简单电路

实际生活中会碰到判断接地极的时候,比如插头、插座的接地极,如图 1-1-17 所示。在检修电子线路时,常常需要测量电路中各点对“地”的电位,以此判断电路的工作是否正常。

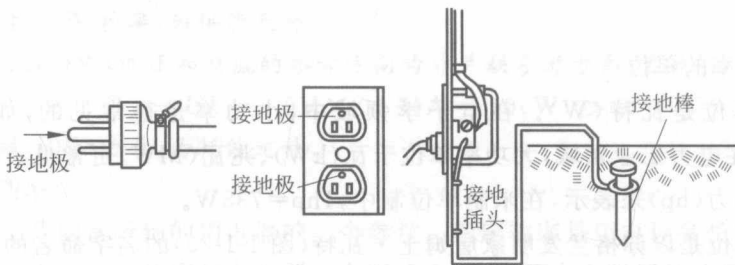


图 1-1-17 插头中的接地

3. 电能

能量以各种形式存在,包括电能、热能、光能、机械能、化学能以及声能。能量既不能被创造,也不能被消灭,只能从一种形式转化为另一种形式。例如,一盏白炽灯可以把电能转化为有用的光能,如图 1-1-18 所示。然而,并不是所有的电能都转化成了光能,大约 95% 的电能转化成了热能。

(1) 电能的定义

电在某一时间段内完成的做功量叫作电能。

(2) 电能的单位

电能的单位是焦耳(J),另一种是千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$),即度。千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)较焦耳(J)更实用。例如,1 个 100W 的灯泡照明 10 小时,使用了 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 的电能。它们之间的关系为 $1\text{kW} \cdot \text{h} = 1\text{度} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$ 。

电能的单位是以英国物理学家詹姆斯·普雷斯科特·焦耳(图 1-1-19)的名字命名

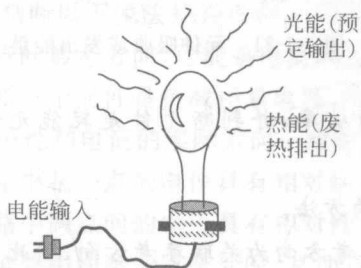


图 1-1-18 电能转化成光能



图 1-1-19 物理学家焦耳