

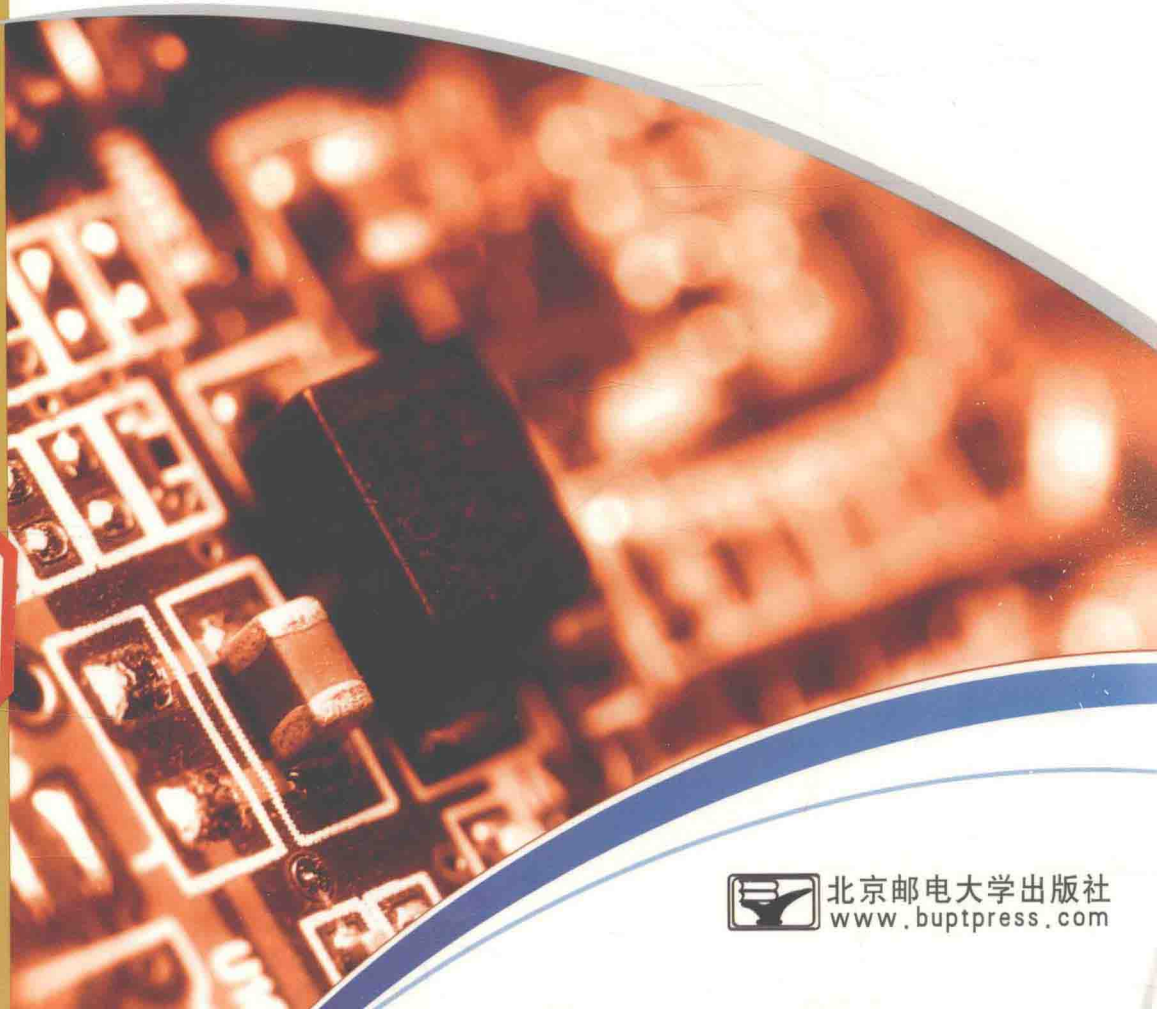


“十三五”普通高等教育规划教材

电工与电子技术

DIANGONG YU DIANZI JISHU

主 编 何志茛 蔡晔敏 陈国明
副主编 汪敬华 张志雄



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

电工与电子技术

主 编 何志茺 蔡晔敏 陈国明

副主编 汪敬华 张志雄

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内 容 提 要

在我国高等教育发展的新形势下,本书根据一般高校培养应用型人才的目标定位,以2011年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会颁布的“电工学”课程教学基本要求中的电工技术与电子技术部分作为编写的基本依据。本书包含的内容有电路的基本概念和分析方法、正弦交流电路、半导体元件及其基本应用、集成运算放大器、基本逻辑门电路和组合逻辑电路以及触发器和时序逻辑电路。

《电工与电子技术》可作为高等学校非电类专业学生学习电工电子技术课程的教材,也可作为从事电工电子技术教学的教师参考用书,对相关的工程技术人员亦有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/何志茛,蔡晔敏,陈国明主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5635-4853-8

I. ①电… II. ①何… ②蔡… ③陈… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 178272 号

书 名	电工与电子技术
主 编	何志茛 蔡晔敏 陈国明
责任编辑	韩 霞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	16
字 数	398 千字
版 次	2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-4853-8

定价: 35.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

“电工与电子技术”是高等工科院校非电类专业的必修基础课之一。根据目前我国高校的教学改革状况和实际的教与学的情况,为进一步提高工程教育的质量,培养具有实践能力和创新能力的工程技术人才,特编写了本书。

《电工与电子技术》涉及面广,内容简练,从系统的角度对基本理论进行阐述,重视外部特性的研究,力求结构化、积木式,以便于选用,扩大了对不同专业的覆盖面。本书包含的内容有电路的基本概念和分析方法、正弦交流电路、半导体元件及其基本应用、集成运算放大器、基本逻辑门电路和组合逻辑电路以及触发器和时序逻辑电路。本书凝结了一线教师历年的教学经验,其中的案例和习题都经过编者精心选择,为教与学提供了方便。鉴于“电工与电子技术”是一门实践性较强的课程,其理论知识与实践结合非常紧密,通过合理的实验环节,能使学生更好地理解电工与电子理论知识,获得电工与电子技术必要的知识和技能,同时注重思维方法的训练和应用研究,以利于培养学生分析和解决实际问题的能力。

本书由上海工程技术大学教师组织编写,由何志茺、蔡晔敏、陈国明任主编,由汪敬华、张志雄任副主编。参加编写的有蔡晔敏(第1、2章),何志茺(第3、4章),陈国明(第5章),汪敬华、张志雄(第6章及思考题习题),由何志茺、蔡晔敏统稿。范小兰副教授审阅了本书,并提出了宝贵意见,在此,谨表示衷心的感谢!

编 者
2016 年 6 月

目 录

第 1 章 电路的基本概念和分析方法	1
1.1 电路的作用与组成部分	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	3
1.2.3 电流、电压的参考方向	3
1.2.4 电功率	4
1.3 电路模型和电路元件	6
1.3.1 电路模型	6
1.3.2 电阻和欧姆定律	6
1.3.3 电源	8
1.4 电路的工作状态	10
1.4.1 电路有载工作	10
1.4.2 电源开路	11
1.4.3 电源短路	11
1.4.4 利用电位简化的电源电路	12
1.5 基尔霍夫定律	13
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	14
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	15
1.6 电阻和电源的等效变换	17
1.6.1 电阻的等效变换	17
1.6.2 电源的等效变换	19
1.7 支路电流法和节点电压法	22
1.7.1 支路电流法	22
1.7.2 节点电压法	23
1.8 叠加定理	25
1.9 等效电源定律	27
1.9.1 戴维宁定理	28
1.9.2 诺顿定理	30
1.10 含受控源的电阻电路	32
小结	33
习题	33
第 2 章 正弦交流电路	40
2.1 正弦量的三要素	40

2.1.1 幅值和有效值	41
2.1.2 周期和频率	41
2.1.3 初相位	42
2.2 正弦交流电的相量表示法	44
2.2.1 复数及其基本运算	44
2.2.2 相量和正弦量	45
2.2.3 正弦量的相量表示法	46
2.2.4 基尔霍夫定律的相量形式	47
2.3 电阻、电感和电容元件的正弦交流电路	49
2.3.1 电阻元件的正弦交流电路	49
2.3.2 电感元件的正弦交流电路	51
2.3.3 电容元件的正弦交流电路	53
2.4 电阻、电感与电容元件的串联电路	56
2.4.1 RLC 串联电路中电压与电流的关系	56
2.4.2 用相量图分析计算 RLC 串联正弦交流电路	58
2.4.3 RLC 串联交流电路功率关系	58
2.5 阻抗的串联与并联	63
2.5.1 阻抗的串联	64
2.5.2 阻抗的并联	65
2.6 电路中的谐振	69
2.6.1 串联谐振	69
2.6.2 并联谐振	72
2.7 功率因数的提高	73
小结	75
习题	76
第3章 半导体元件及其基本应用	81
3.1 半导体的导电特性	81
3.1.1 半导体的导电原理	81
3.1.2 PN 结及其单向导电性	84
3.2 半导体二极管	85
3.2.1 基本结构	85
3.2.2 伏安特性	86
3.2.3 主要参数	87
3.2.4 应用	88
3.3 特殊二极管	89
3.3.1 稳压二极管	89
3.3.2 其他二极管	92
3.4 晶体三极管	93
3.4.1 基本结构	93
3.4.2 电流放大原理	94

3.4.3 特性曲线	96
3.4.4 主要参数	99
3.4.5 光电晶体管	100
3.5 共发射极放大电路	101
3.5.1 放大的基本概念	101
3.5.2 基本组成	102
3.5.3 静态分析	104
3.5.4 动态分析	106
小结	113
习题	113
第4章 集成运算放大器	121
4.1 概述	121
4.1.1 集成电路概述	121
4.1.2 集成运放的基本结构	122
4.1.3 差动放大电路	123
4.1.4 主要参数	127
4.1.5 电压传输特性	128
4.1.6 理想特性	129
4.2 放大电路中的负反馈	131
4.2.1 反馈的基本概念	131
4.2.2 负反馈的四种类型	132
4.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	133
4.3 集成运放在模拟信号运算方面的应用	135
4.3.1 比例运算电路	136
4.3.2 加法运算电路	137
4.3.3 减法运算电路	138
4.3.4 积分运算	139
4.3.5 微分运算	140
4.4 集成运算放大器在信号比较方面的应用	142
4.4.1 单限电压比较器	142
4.4.2 过零比较器	143
4.4.3 滞回比较器	143
4.5 集成运算放大器的合理使用	144
4.5.1 选择	144
4.5.2 消除自激振荡	145
4.5.3 调零	145
4.5.4 保护	146
4.6 集成运放的应用实例	146
小结	148

习题	148
第5章 基本逻辑门电路和组合逻辑电路	156
5.1 数字电路概述	156
5.1.1 模拟信号和数字信号	156
5.1.2 脉冲信号	156
5.1.3 晶体管的开关特性	157
5.1.4 数制及其转换	157
5.2 逻辑门电路	159
5.2.1 基本逻辑关系和逻辑门电路	159
5.2.2 TTL 门电路	166
5.2.3 CMOS 门电路	171
5.3 逻辑函数的表示和化简	173
5.3.1 逻辑代数的基本运算法则	173
5.3.2 逻辑函数的表示及相互转换	174
5.3.3 逻辑函数的化简	179
5.4 组合逻辑电路的分析和设计	183
5.4.1 组合逻辑电路的分析	183
5.4.2 组合逻辑电路的设计	187
5.5 组合逻辑器件	190
5.5.1 加法器	191
5.5.2 编码器	194
5.5.3 译码器	197
小结	201
习题	201
第6章 触发器和时序逻辑电路	208
6.1 双稳态触发器	208
6.1.1 基本 RS 触发器	208
6.1.2 可控 RS 触发器	210
6.1.3 JK 触发器	212
6.1.4 D 触发器	215
6.1.5 触发器逻辑功能的转换	217
6.2 时序逻辑电路的分析	219
6.3 寄存器	223
6.3.1 数码寄存器	223
6.3.2 移位寄存器	225
6.4 计数器	228
6.4.1 二进制计数器	229
6.4.2 十进制计数器	233
6.4.3 任意进制计数器的实现	237
小结	238
习题	239

参考文献	248
------------	-----

第1章 电路的基本概念和分析方法

电路分析是电工技术和电子技术的基础,为今后学习电子电路以及控制与测量电路打下基础。

本章对描述电路的基本物理量——电流、电压和电功率等进行了复习,并讨论了电压、电流的参考方向问题。从电路模型入手,介绍组成电路的各种电路元件及其伏安特性。阐述了电路理论中的基本定律——基尔霍夫定律。文中着重以直流电路为例,介绍了分析电路的一些基本方法和定理,主要有支路电流法、节点电压法、叠加定理以及电源的等效变换、戴维宁定理、诺顿定理等。这些方法和定理同样适用于对正弦交流等时变信号电路的分析和计算。因此,本章内容是学习电工电子技术课程的重要基础。

1.1 电路的作用与组成部分

电路是电流的通路,它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电在现代日常生活、工农业生产、科研和国防等许多方面都有十分广泛的应用。从技术领域来看,电的应用可分为能量和信息两大领域,它们都利用了电能几乎可以瞬时地传送到远处的这一性质。

电力系统涉及大规模电能的产生、传输和转换(转换为其他形式的能量),构成现代工业生产、家庭生活电气化等方面的基础。在这类电路里,能量是主要的着眼点。

电能也可以以极其微小而被精确控制的形式传送,具有携带信息的能力,如日常的电话通信、计算机间信息的交流等,电是控制其他形式能量最有效的手段。在这类电路里,信息是主要的着眼点。电用作信息处理和交换的媒介已成为当代信息社会的显著特征。

电路的形式多种多样,大至长距离的电力输电线,小至微电子芯片上的集成电路,功能各有不同,但它们是受共同的基本规律支配的,这就是电路的基本分析方法和基本性质。

不论是传输能量的电路,还是做信号处理的电路,都有电源、负载和中间环节三个组成部分。

电源是电路中提供电能或电信号的装置。例如发电厂里的发电机,把热能、水能或核能转换为电能;又例如收音机电路中,天线可以接收到电台发出的载有声音信息的无线电波,天线提供电信号,就是电路的信号源。

负载是电路中将电能转化为其他形式的能量或将处理过的信号传递出来的装置。例如灯泡将电能变为光能、电动机将电能变为机械能;又例如收音机的扬声器,将处理和放大后的电台声音信号重现出来。

中间环节是电路中连接电源和负载之间的装置,起着传输分配电能或处理电信号的作用。例如发电厂和用户之间的输电线路、变压器、控制开关等;又例如收音机电路中对信号进行放大和处理的电路。

不论电能的传输和转换,或者信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或电流称为激励,它推动电路工作;激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路的结构和元件参数的条件下,讨论电路的激励与响应之间的关系。

【思考题】

举出一个生活中的电路,并分析它完成的是何种作用,它的负载将电能转化为何种能源或者处理的是什么信号?

1.2 电路的基本物理量

众所周知,物质都是由原子构成的,原子由原子核和在它周围高速运动的电子组成。电子沿一定的轨道绕原子核旋转,其中,有一部分在最外层轨道的电子可以脱离原子核的束缚,在原子之间自由地流动,这种电子被称为自由电子。自由电子多的物质,比如金属,容易导电,所以被称为导体。自由电子少的物质,比如木材、陶瓷,不容易导电,被称为绝缘体。

电和水有非常类似的特点。如图 1.2.1(a)所示,水槽 A 和水槽 B 中水位的高度不同,在水槽 A、B 之间连接水管,由于水位的落差,就会产生水压,水在水压的作用下从水位高处往水位低处流动从而形成水流。如果再在水槽 A、B 之间加入一个抽水泵,那么水流就会持续不断地在 A、B 之间流动。在水管中放上涡轮,它就会被水流推动得转起来,阀门则可以控制水流停止。如图 1.2.1(b)所示,用导线将电源与灯泡连接起来,灯泡将被点亮。这个电路的原理和图 1.2.1(a)的水路原理是类似的。电源的正极与负极之间有电位的落差,因此存在电压。导线(铜线)的最外层电子容易变成自由电子,在电压的作用下,电子就会流动;自由电子带负电荷,而我们把正电荷流动的方向视为电流的方向。当电流流过电灯,电灯就会被点亮,开关则可以控制电流停止。

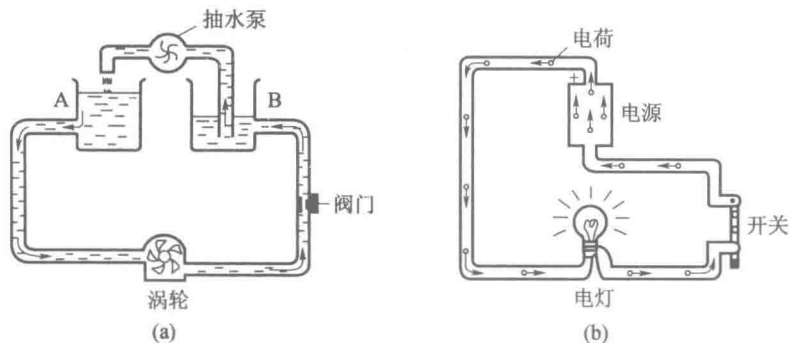


图 1.2.1 水路与电路图

1.2.1 电流

电荷的定向运动形成电流,物理中把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流的大小为单位时间内通过导体截面积的电量,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

式中, i 表示电流, q 表示电荷量, t 表示时间。

在国际单位制中,时间的单位为 s(秒)、电量的单位为 Q(库仑)、电流的单位为 A(安培),简称安。常用的电流单位还有 kA(千安)、mA(毫安)、 μ A(微安)。

如果电流的大小和方向不随时间变化,称为直流电流,用大写字母表示,如图 1.2.2(a)所示, $I=5\text{ A}$ 。如果电流的大小和方向随时间作周期变化,则称为交流电流,用小写字母表示,如图 1.2.2(b)所示, $i=5\sin\omega t\text{ A}$ 。

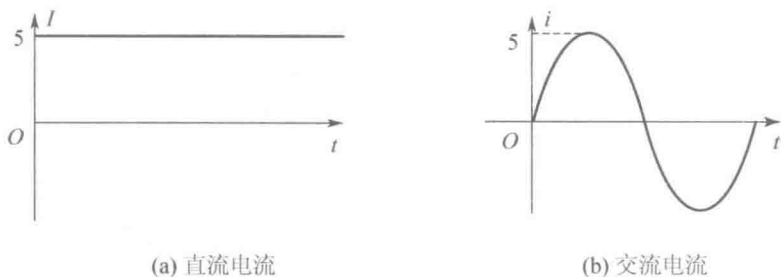


图 1.2.2 电流图

其他的电路物理量如电压、电功率等,也用同样的大、小写方式来区分直流量和交流量。

1.2.2 电压

电压是描述电场力移动单位电荷所需要的能量。电路中 a, b 两点之间的电压 u 表示把单位正电荷由 a 点移动到 b 点所需要的能量,即

$$u = \frac{d\tau}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中, u 表示电压, τ 表示能量。

国际单位制中, τ 的单位为 J(焦耳),电压的单位是 V(伏特)。常用的电压单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)、 μ V(微伏)。如前所述,直流电压用大写字母 U 表示,交流电压用小写字母 u 表示。

与电压相关的物理量还有电动势和电位,它们的单位都与电压一样是 V(伏特)。电动势用字母 E 表示,特指电源内部克服电场力做功的能力。电位用字母 V 表示,指电路在指定参考点以后,各点相对于它的电压,关于电位会在后面的内容中详述。

1.2.3 电流、电压的参考方向

在分析电路的过程中,我们经常需要对电路中的某个元件上的电压和电流进行数学形式

的计算。后面会提到,所有的理想电路元件都能用数学公式或曲线描述其电压和电流的关系。在标记电路中某个元件的电压和电流的时候,我们采用如图 1.2.3 所示的方法。

图中的方框表示电路中的某个元件,电流的方向用箭头标示,电压的方向用正负号标示。图中所示的方向,均为参考方向。实际的电压、电流的数值与方向的关系,如表 1.2.1 所示。

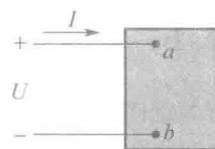


图 1.2.3 电压和电流的标示方法

表 1.2.1 电压和电流的数值与方向的关系

	正值(>0)	负值(<0)
电压 U	从 a 到 b 电压降低	从 a 到 b 电压升高
电流 I	与箭头方向相同 从 a 流入,从 b 流出	与箭头方向相反 从 a 流出,从 b 流入

如图 1.2.3 所示,若 $I=1\text{ A}$, $U=5\text{ V}$,则电路中的电流大小为 1 A ,从 a 点流入, b 点流出,电压从 a 点到 b 点降低 5 V 。若 $I=-1\text{ A}$, $U=-5\text{ V}$,则电路中的电流大小为 1 A ,从 b 点流入, a 点流出,电压从 a 点到 b 点升高 5 V 。

电压和电流的参考方也可用双下标标示。图中 a 、 b 点之间的电流可标记为 I_{ab} ,也就是从 a 点流入,从 b 点流出。图中 a 、 b 点之间的电压可标记为 U_{ab} ,也就是 a 点为“+”, b 点为“-”。

在分析电路的过程中,参考方向经常是随意设定的,因为可能并不知道电路实际的运动方向,就如同设未知数一样,只有在计算出算数结果的时候,才能掌握电路运行的确切情况。

但是,参考方向一旦设定,在后续的分析和计算过程中,都需要按照这个选定的方向来带入公式,而不能随意更改。

在带入公式计算的过程中,需要考虑电压的方向与电流的方向之间的相互关系。如图 1.2.3 所示的电压和电流方向,称为**关联参考方向**(或方向一致),即电流沿着电压下降的方向流动,在这种情况下,可以直接带入公式进行计算。但是如果电压和电流中有一个方向与图示相反,则称为**非关联参考方向**(或方向不一致),那么,在运用公式的时候,都需要在整个公式的前面加上一个负号。

1.2.4 电功率

电路中,电气设备在单位时间内所消耗的电能称为电功率,用 P 表示,简称功率,根据功率和前面介绍的电压、电流的定义,我们可以知道功率的计算公式

$$P = \frac{dw}{dt} = \left(\frac{dw}{dq} \right) \left(\frac{dq}{dt} \right) = ui \quad (1.2.3)$$

即功率为电路元件两端的电压和通过的电流的乘积。

当电压和电流都为直流时,

$$P = UI \quad (1.2.4) \text{①}$$

国际单位制中,功率的单位是 W (瓦特),常用的功率单位还有 kW (千瓦)、 mW (毫瓦)等。

① 在本章内容中,如无特殊说明,后续公式中各电量都以大写字母表示,对交流电路的计算同样适用。

电路元件在一段时间内消耗的电能用 W 表示,

$$W = Pt = UI t \quad (1.2.5)$$

式(1.2.5)中 t 为时间。若设备的功率为 1 kW, 使用时间为 1 h, 则消耗电能为 1 kWh, 也称为 1 度电。

在计算功率的时候, 也不能忘记电压和电流的方向问题, 如图 1.2.4(a)、(d)所示, 电压和电流为关联参考方向(电流沿着电压降低的方向流动)时, 直接使用式(1.2.4)。但当电压和电流为非关联参考方向时, 如图 1.2.4(b)、(c)所示, 需要在式(1.2.4)的前面加上一个负号, 此时

$$P = -UI \quad (1.2.6)$$

当正电荷沿着电压降低的方向移动时, 会失去能量, 即消耗电能。当正电荷沿着电压升高的方向移动时, 会获得能量, 即产生电能。如图 1.2.4 所示为电压电流在不同参考方向的情况下功率的计算方法。

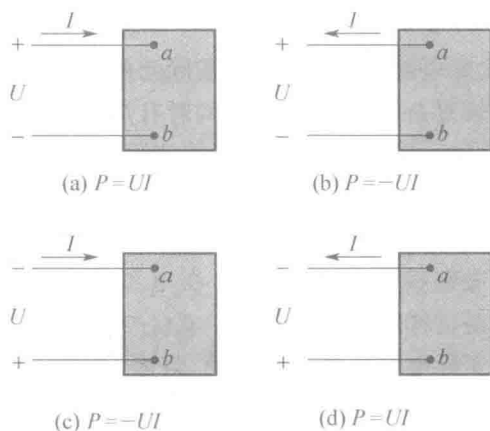


图 1.2.4 不同参考方向下功率的计算

所以, 如果功率是正数($P > 0$), 说明方框中所含的元件或电路是消耗电能的, 称之为负载。如果功率是负数($P < 0$), 说明它产生电能, 称之为电源。

例如, 图 1.2.4(b)中, 如果已知 $I = 4 \text{ A}$, $U = -10 \text{ V}$, 那么 a, b 两端之间的电路中, 功率 $P = -UI = -(-10) \times 4 = 40 \text{ W}$, 所以方框中的电路以 40 W 的功率消耗电能, 是一个负载。

功率的“+”、“-”不说明其大小, 只代表产生或消耗电能。因此, 一个 $P = 40 \text{ W}$ 的元件与一个 $P = -40 \text{ W}$ 的元件相比, 两者功率一样大, 前者消耗电能, 后者产生电能。

【思考题】

1. 在图 1.2.4 所示电路中, 电压从 b 到 a 降低 20 V, 电流为 4 A 从 b 流入, 请分析:

- (1) 图(a)~(d)所示参考方向下, 电压 U 和电流 I 的数值;
- (2) 计算各图电路的功率, 并判断哪个是电源, 哪个是负载。

2. 如图 1.2.5 所示, 湖北三峡电厂有一条直流高压输电线路连接至上海南桥变电站, 其电压为 500 kV, 电流为 1 800 A, 请计算三峡电厂的功率, 并分析电能输送的方向。

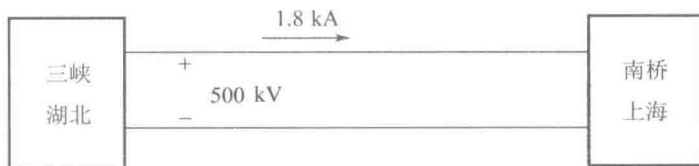


图 1.2.5 思考题 2 的电路图

1.3 电路模型和电路元件

1.3.1 电路模型

任何实际电路都是由实际电路元件组成的。实际元件如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管等,它们的电磁性质比较复杂,在电路中往往同时有热效应、电磁效应和电场效应,不便进行分析计算和用数学模型描述。因此,在分析和计算实际电路时,常用一个或几个理想元件来代替实际元件。一个理想元件可以精确定义并准确地表示出实际元件的某一主要特征。这样,一个实际的电路就可以抽象成由一些理想元件组成的电路模型,简称电路。在电工技术中,我们讨论的电路指的都是这样的电路模型。

例如常用的手电筒,其实际电路元件有干电池、灯泡、开关和筒体,电路模型如图 1.3.1 所示。灯泡是电阻元件,其参数为电阻 R ;干电池是电源元件,包含电动势为 E 的理想电压源和内电阻(简称内阻) R_0 ;筒体是连接干电池与灯泡的中间环节(包括开关 S),其电阻忽略不计,认为是无电阻的理想导体。

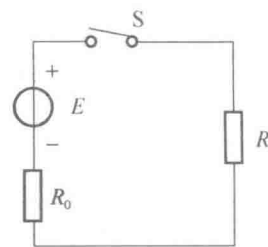


图 1.3.1 手电筒的电路模型

1.3.2 电阻和欧姆定律

电阻元件是一种将电能转化为热能的理想电路元件,电流通过它时将受到阻力, R 表示电阻元件阻碍电流通过这一物理性质的参数。电阻的电路符号如图 1.3.2 所示。

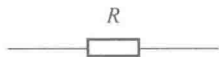


图 1.3.2 电阻的电路符号

电阻上的电压和电流符合**欧姆定律**:

$$U=RI \quad (1.3.1)$$

国际单位制中,电阻的单位是 Ω (欧姆),其他的电阻单位还有 $k\Omega$ (千欧)、 $M\Omega$ (兆欧)。

与功率的计算一样,在使用欧姆定律时,我们需要考虑电压和电流的方向关系,当电压和电流为关联参考方向时,如图 1.3.3(a)所示,可直接使用式(1.3.1)进行计算;而当电压和电

流为非关联参考方向时,如图 1.3.3(b)所示,则需要在公式前面加上负号。

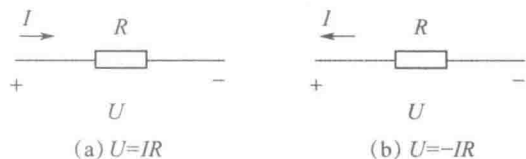


图 1.3.3 欧姆定律的计算

电阻元件中电压和电流的关系曲线称为伏安特性。如果电阻两端的电压与通过的电流成正比,其伏安特性为通过坐标原点的一条直线,如图 1.3.4(a)所示。说明 R 是一个常数,这种电阻称为**线性电阻**。如果电阻上的电压和电流值不成正比,它的伏安特性不是一条直线,参数 R 就不是一个常数,这种电阻称为**非线性电阻**。非线性电阻的阻值随电压、电流而变化。二极管是一个比较典型的非线性电阻,其伏安特性如图 1.3.4(b)所示。

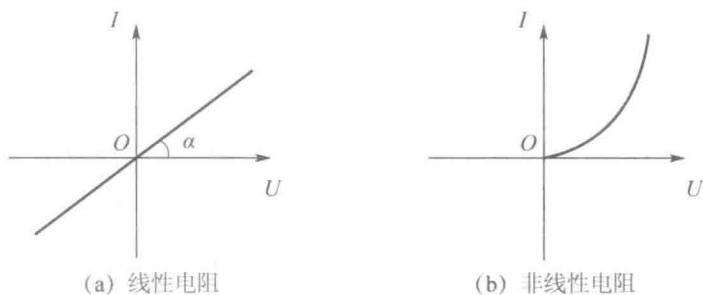


图 1.3.4 电阻的伏安特性

电阻是耗能元件,其消耗的电功率为

$$P=UI=\frac{U^2}{R}=I^2R \quad (1.3.2)$$

【案例】 人体电阻

我们经常会看到“高压危险”这样的警示牌,这是因为人体也有电阻,所谓“触电”就是指人体被接入到电路中时,由于电源电压作用,在人体产生电流,从而出现有可能导致人身伤亡的事故。

一般在干燥环境中,人体电阻大约在 $2\text{ k}\Omega\sim 20\text{ M}\Omega$ 范围内;皮肤出汗时,约为 $1\text{ k}\Omega$;皮肤有伤口时,约为 $800\text{ }\Omega$ 。人体触电时,皮肤与带电体的接触面积越大,人体电阻越小。

表皮具有这样高的电阻是因为它没有毛细血管。手指某部位的皮肤还有角质层,角质层的电阻值更高,而不经常摩擦部位的皮肤的电阻值是最小的。皮肤电阻还同人体与带电体的接触面积及压力有关。当表皮受损暴露出真皮时,人体内因布满了输送盐溶液的血管而电阻很低。

不同电压下人体电阻的大小也有区别。一般认为干燥的皮肤在低电压下具有相当高的电阻,约 $100\text{ k}\Omega$ 。当电压在 $500\sim 1000\text{ V}$ 时,这一电阻便下降为 $1\text{ k}\Omega$ 。

触电的时候,真正对人体造成伤害的,其实并不是电压,而是由于在电压的作用下,流过人体的电流。

最普通的电伤害是对神经系统的伤害。神经传导使用的是电化学信号,电流可能破坏这

些信号。当电流只是流过骨骼肌肉时,会产生包括暂时麻痹(神经信号停止)或不自觉的肌肉收缩,这些危害一般没有生命危险。然而,当电流流过包含控制大脑供氧的神经和肌肉时,就会威胁生命。这些肌肉的暂时麻痹可能使人停止呼吸,而且忽然的肌肉收缩可能破坏控制心跳的信号,造成流向大脑的供氧血液暂停。除非立刻得到急救,否则几分钟之内就会引起死亡。表 1.3.1 列出了通过事故数据分析得到的不同大小电流作用下会造成的生理反应。

表 1.3.1 不同电流下人体的生理反应

生理反应	电 流
仅仅有感觉	3~5 mA
极端痛苦	35~50 mA
肌肉麻痹	50~70 mA
心跳停止	500 mA

图 1.3.5(a)表现了当人体触电时的情况,当手臂和腿意外碰到了电源两端时,人体会有电流流过。将人体简化成如图 1.3.5(b)所示的电阻模型,手臂、腿、颈部和躯干各有不同的电阻,此时电流会流过躯干部分,因此也会流过心脏,这就存在致命的危险。

通电回路包含电源电压 U ,手臂电阻 R_A ,躯干电阻 R_T ,腿部电阻 R_L ,其电路模型如图 1.3.5(c)所示。如果电源电压 $U=220\text{ V}$,通电回路的全部人体电阻 $R=500\text{ }\Omega$,由欧姆定律,此时的触电电流 $I=\frac{U}{R}=\frac{220}{500}=440\text{ mA}$,参照表 1.3.1 此电流已大大超过使人肌肉麻痹的数值,几乎足以使心脏停止跳动,造成生命危险。

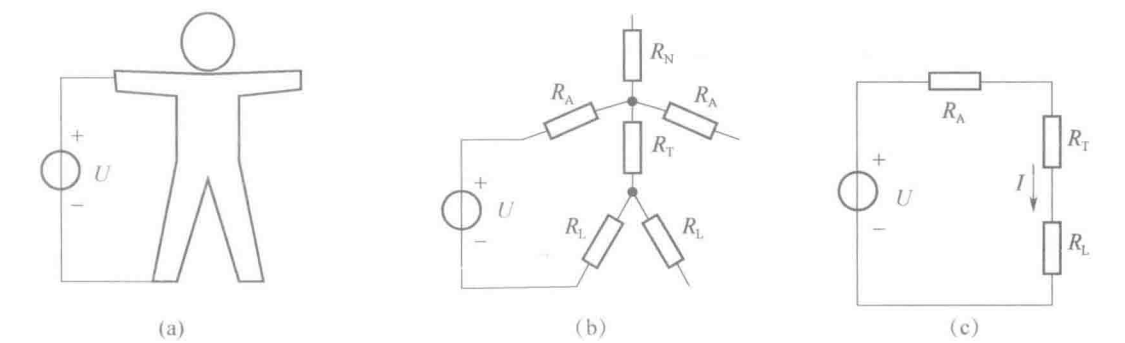


图 1.3.5 人体触电情况的示意图和电路模型

1.3.3 电源

所谓电源,就是能将其他形式的能量转换为电能,而且反过来也能把电能转换为其他能源的设备。比如充电电池,在充电的时候,它把电能转化为化学能;在放电的时候,则把化学能转化为电能。又比如发电机,当它把机械能转化为电能的时候,就是在发电,当它把电能转化为机械能的时候,就是电动机。一个电源,在电路中提供还是消耗电能,是由它实际工作时的电流和电压决定的。根据式(1.2.4)中提到的功率的计算方法,可以对其进行判断。当然,在分析电路的过程中,我们需要建立实际电源转化为理想电路元件的模型。理想电源根据其提供