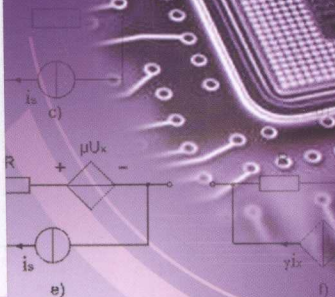




普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材

电路基础

主 编 吴仕宏



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材

电 路 基 础

主 编 吴仕宏

副主编 李广伟 胡 博 黄 蕊 姜凤利 杨 萍

参 编 谷彩莲 谭东明 李征明 张 宁 史云玲



机械工业出版社

本书在介绍电路理论基本知识的基础上,依次介绍了直流电路、正弦交流电路、谐振与耦合电路及三相电路等内容。

本书把重点放在基本定律、基本定理和解题技巧上,并适当地引入了有实际应用背景的电路实例。每章大多以电子工程先驱人物的介绍,基本的电路及元件,相关的定义、定理和说明性的例子来开头,每章后设计了大量不同难度的习题。一些习题强调了重要知识点,这对学生正确、充满自信地应用电路的基本原理起到了很大作用。大量的习题可帮助学生更好地掌握解题技巧,书后附有习题答案。本书的附录主要为相关的行列式、复数、数学公式等内容,可帮助学生更好地完成“电路”课程的学习。

本书不但适合高等院校电气类、自动化类、电子信息类等专业的学生使用,还适合其他工科专业的学生使用,也可作为工程技术人员以及高校教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/吴仕宏主编. —北京:机械工业出版社,
2015.2
普通高等教育“十二五”电工电子基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-48738-8

I. ①电… II. ①吴… III. ①电路理论-高等学校-
教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第034728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:吉玲 责任编辑:吉玲 王康 徐凡
责任校对:张莉娟 胡艳萍
责任印制:刘岚
北京京丰印刷厂印刷
2015年3月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·14.5印张·400千字
标准书号:ISBN 978-7-111-48738-8
定价:29.80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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

电路理论课是国家教育部规定的电子信息类专业的专业基础课,也是电气工程、信息工程、控制工程、计算机及微电子等领域的一门重要的基础学科。《电路基础》主要分析研究电路中电磁现象的变化规律,逻辑性、系统性和理论性强,通过培养学生严谨的思维能力和分析问题和解决问题的能力,进而培养学生的创新能力,为后续相关学科的学习打下坚实的基础。

本书结合沈阳农业大学等高校在电路理论课程教学改革中的成果,并借鉴了国内外优秀教材的特点,总结和吸收入各院校教学改革的有益经验。本书注重理论的系统性、实用性和应用性,注重电路理论的基本概念、基本原理及应用的分析,力求做到内容精练、论证严密、重点突出、适用面广,使教材兼顾强电和弱电类专业共同的教学需求。本书内容遵循由简到繁、逐步深入的原则,采用先静态(直流)、后稳态(正弦交流)的教学体系,力求难点分散,利于教学,完善和提高教学效果。

全书共分为5章,各章均以基本定义、电路元件(包括受控源)、电路定律、定理和分析方法(如节点电压法、网孔电流法)等开头,这些定理和方法先用于直流电阻电路而后又通过阻抗和复频率的使用应用于交流电路。在稳态电路中介绍了复频率的概念,不但涵盖了相量分析、正弦稳态、功率以及功率因数等概念,也包括了互感和变压器的详细内容。同时本书提供了大量不同难度的习题和习题答案供读者参考。本书建议教学学时为50~60学时。

本书的主要特点是:

- 每章的开头均给出了本章的学习目的和导入内容。
- 介绍了一些电学相关领域的先驱人物的历史。
- 系统地阐述理论的同时,突出了工程应用,做到了理论与应用相结合。
- 大量应用例题及课后自测习题。
- 书后以附录的形式提供了利用克莱姆法则解方程组的方法及常用数学公式等。

书中内容凝聚了各位老师的心血,在这里向所有为本书做出贡献的教师同行表示衷心的感谢。

本书的作者分别为沈阳农业大学、沈阳工程学院、西北农林科技大学、黑龙江工业学院、东北农业大学成栋学院的一线教师,本书编写过程中参阅了其他同类教材和相关文献资料,在此对这些教材和文献的作者深表感谢。

由于编者水平和时间所限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电路分析的基本概念和基本定律

1.1 导论	2
1.2 国际单位制	2
1.3 词头	4
1.4 电路图	4
1.5 电压和电流	6
1.6 电荷的单位	7
1.7 电压	8
1.8 电流	9
1.9 电阻	10
1.10 欧姆定律, 功率和能量	14
1.10.1 欧姆定律	14
1.10.2 电压极性与电流方向	14
1.10.3 功率	16
1.10.4 电气与电子系统中的功率	17
1.10.5 功率方向的规则	18
1.10.6 能量	19
1.10.7 非线性与动态电阻	20
1.11 串联电路	21
1.11.1 电路的串联	21
1.11.2 基尔霍夫电压定律	23
1.11.3 电阻的串联	23
1.11.4 电压源的串联	25
1.11.5 串联元件的互换	25
1.11.6 分压定则	26
1.11.7 电路接地	27
1.11.8 电压下标	28
1.11.9 电压源的内阻	29
1.12 并联电路	30
1.12.1 电路的并联	30
1.12.2 基尔霍夫电流定律	31
1.12.3 电阻的并联	32
1.12.4 电压源的并联	34
1.12.5 分流定则	35
1.12.6 并联电路的分析	37

1.13 串并联电路	37
1.13.1 串并联网络	38
1.13.2 串并联电路的分析	39
1.13.3 串并联电路的应用	40
习题	42
第2章 分析方法与电路定理	48
2.1 理想电流源	49
2.2 电源转换	50
2.3 电流源的并联与串联	52
2.4 支路电流法	53
2.5 网孔(回路)法	54
2.6 节点电压法(节点法)	57
2.7 Δ -Y(π -T)变换	60
2.8 桥电路	63
2.9 叠加定理	65
2.10 戴维南定理	68
2.11 诺顿定理	71
2.12 最大功率传输定理	75
2.13 替代定理	76
2.14 弥尔曼定理	77
2.15 互易定理	79
习题	80
第3章 正弦交流电路	87
3.1 电容与电容器	88
3.1.1 电容	88
3.1.2 电容器的串并联	89
3.1.3 电容器的电流和电压	90
3.1.4 电容器的储能	92
3.2 电感与电感器	93
3.2.1 电磁感应	94
3.2.2 感应电压与电感	95
3.2.3 自感	96
3.2.4 电感的串并联	97
3.2.5 电感和直流稳态电路	98
3.2.6 电感器的储能	98
3.3 交流基础	99
3.3.1 引言	99

3.3.2 交流电压的产生	100	的关系	151
3.3.3 频率、周期、幅值和峰值	101	3.8.8 功率因数	152
3.3.4 正弦波的角与图形关系	103	习题	155
3.3.5 作为时间函数的电压和电流	103	第4章 谐振与耦合电路	163
3.3.6 相量简介	104	4.1 串联谐振	164
3.3.7 有效值	105	4.2 品质因数	165
3.4 R 、 L 和 C 及复阻抗	107	4.3 串联谐振电路的阻抗	166
3.4.1 复数	107	4.4 串联谐振电路的功率、带宽及 选择性	167
3.4.2 交流分析中的复数	110	4.5 并联谐振	169
3.4.3 电阻与正弦交流电路	113	4.6 耦合电路和变压器	171
3.4.4 电感与正弦交流电路	113	4.6.1 松耦合电路	172
3.4.5 电容与正弦交流电路	115	4.6.2 正弦激励下的磁耦合电路	175
3.4.6 阻抗	116	4.7 变压器	176
3.5 交流串并联电路	118	4.7.1 空心变压器	177
3.5.1 交流电路的欧姆定律	118	4.7.2 理想变压器	181
3.5.2 交流串联电路	121	习题	186
3.5.3 基尔霍夫电压定律与分压 定则	123	第5章 三相电路	189
3.5.4 交流并联电路	125	5.1 三相电压的产生	190
3.5.5 基尔霍夫电流定律与分流 定则	126	5.2 三相电压源	191
3.5.6 串并联交流电路	127	5.3 Y - Y 联结电路的分析	192
3.5.7 频率效应	128	5.4 Y - Δ 联结电路的分析	196
3.6 交流电路分析方法	131	5.5 不对称负载	198
3.6.1 受控源	131	5.6 三相电路的功率	200
3.6.2 电源变换	132	习题	203
3.6.3 网孔(回路)法	132	部分习题参考答案	205
3.6.4 节点法	135	附录	212
3.6.5 Δ - Y 等效变换和 Y - Δ 等效 变换	136	附录 A 利用克莱姆法则求解方程组	212
3.6.6 桥电路	137	附录 B 复数	215
3.7 交流电路定理	138	B.1 复数的表示法	215
3.7.1 叠加定理	138	B.2 复数的数学运算	217
3.7.2 戴维南定理——独立源	139	B.3 欧拉公式	218
3.7.3 最大功率传输定理	143	B.4 重要的恒等式	219
3.8 交流电路中的功率	145	附录 C 数学公式	219
3.8.1 引言	146	C.1 二次方程式	219
3.8.2 阻性负载的功率	147	C.2 三角函数恒等式	219
3.8.3 感性负载的功率	147	C.3 双曲函数	220
3.8.4 容性负载的功率	148	C.4 导数	220
3.8.5 复杂交流电路的功率	150	C.5 不定积分	220
3.8.6 视在功率	150	C.6 定积分	222
3.8.7 有功功率、无功功率及视在功率间 的关系	151	C.7 洛必达法则	222
		参考文献	223

第 1 章 电路分析的基本概念和基本定律

学习目的

● 掌握基本的国际单位以及单位之间的转换

● 利用 10 的幂次方对数字进行简化处理

● 利用标准词头来描述电量的单位

● 能够表述何为框图以及使用框图的原因, 描述导体、绝缘体、半导体的特性和描述作为电荷单位的库仑

● 定义电压和电流

● 确定一段已知断面和长度的导体的电阻

● 利用色环确定一个已知固定电阻器的电阻和偏差

● 能够计算任一电阻元件的电导

● 能够利用欧姆定律计算简单电路的电压、电流和电阻

● 能够利用电压参考惯例确定极性

● 能够描述电阻电路的电压、电流和功率

● 学会计算直流电路中的功率, 利用功率参考惯例来确定功率的传递方向

● 学会计算负载所消耗的电能

● 学会计算串联电路中的总电阻和电流

● 利用欧姆定律和分压公式求解电路中各电阻两端的电压

● 学习基尔霍夫电压定律, 并利用该定律对已知电路进行分析

● 学会求解串联电路中各电阻消耗的功率并说明消耗的总功率恰好与电源发出的功率相等

● 辨别一已知电路中哪些元件或支路并联, 哪些元件或支路串联, 并计算电阻并联电路的总电阻和总电导

● 可以应用基尔霍夫电流定律求解未知电流

● 说明数值不等的电压源不能并联的原因

● 学会求解由电阻串并联组成的电路的总电阻

● 学会求解串并联电路中流过任意支路或原件的电流

● 确定串并联电路中任意两点间的电位差

电路: 电路元件的相互连接构成了电路, 电路元件包括电阻器、电容器、电感器、电压源和电流源等。这些元件的电气特性是由一些基本定律来表征的。在这些定律、原理、概念和分析方法基础上发展起来的理论称为电路理论。

电路理论的主要任务是完成问题的求解和数值分析。例如, 当我们分析一个电路问题的时候, 需要计算电压、电流和功率, 同时答案还必须包括物理量的单位。本书中使用的是国际单位制 (SI)。国际单位制是源自米制的标准度量衡单位系统, 不仅包括了我们熟知的长度单位“米”, 质量单位“千克”和时间单位“秒”, 而且包括电磁量的单位如“伏特”、“安培”等。然而, 国际单位制在我们使用的时候常常不是太大就是太小, 不便于使用。为此, 出现了一些工程符号和一套标准的前缀, 并常常用于数值的表示和计算。

由于电路理论有些抽象, 常常用电路图来帮助加深理解。本书介绍了三类电路图 (原

理图、示意图和框图) 以及它们的使用方法。

在分析电路时, 需要求解许多问题。下面列出了求解电路问题的一般步骤:

- (1) 画出电路图并在上面标出你所知道的物理量, 然后弄清你要求解的问题。
- (2) 认真思考问题以便弄清解决该问题所涉及的原理, 然后找到未知量与已知量之间的关系。
- (3) 将已知量代入选定的方程解出未知量。
- (4) 检查答案是否正确, 也就是检查其适用范围是否恰当, 符号是否正确, 单位是否匹配等。

1.1 导论

随着科技的发展, 人们的生活方式不断发生改变, 计算机走进了千家万户, 电子控制系统在汽车上得到了广泛应用, 手机成为人们的生活必需品, 机器人取代工人在生产线上装配产品。这些技术的基础正是电路理论。电路理论为我们提供了理解电气及电子设备、电路和系统工作所需要的基本理论知识。本书对电路理论的基本思想进行了探究。

1.2 国际单位制

国际上主要有两种单位制: 英制(美国习惯用该单位制)和米制。一些常用的英制单位与米制单位的转换见表 1-1。

表 1-1 常见的英制单位与米制单位的转换

1 米 = 100 厘米 = 39.37 英寸	1 码 = 0.9144 米
1 毫米 = 39.37 密尔	1 英里 = 1.609 千米
1 英寸 = 2.54 厘米	1 千克 = 1000 克 = 2.2 磅
1 英尺 = 0.3048 米	1 加仑 = (US) 3.785 升

国际单位(SI)制将 MKS 米制和电量的单位结合成统一的单位制, 见表 1-2 和表 1-3。表 1-2 中的单位为国际单位制的基本单位, 表 1-3 中的单位被称为从表 1-2 中导出的单位。值得注意的是, 一些符号和缩写使用大写字母, 而有些使用的却是小写字母。

表 1-2 一些国际单位制的基本单位

量的名称	符 号	单位名称	单位符号
长度(Length)	l	米(meter)	m
质量(Mass)	m	千克(kilogram)	kg
时间(Time)	t	秒(second)	s
电流(Electric Current)	I, i	安培(ampere)	A
温度(Temperature)	T	开尔文(kelvin)	K

表 1-3 一些从国际单位制中导出的单位

量的名称	符 号	单位名称	单位符号
力(Force)	F	牛顿(newton)	N
电能(Energy)	W	焦耳(joule)	J

(续)

量的名称	符 号	单位名称	单位符号
功率(Power)	P, p	瓦(watt)	W
电压(Voltage)	V, v, E, e	伏特(volt)	V
电荷(Charge)	Q, q	库伦(coulomb)	C
电阻(Resistance)	R	欧姆(ohm)	Ω
电容(Capacitance)	C	法拉(farad)	F
电感(Inductance)	L	亨利(henry)	H
频率(Frequency)	f	赫兹(hertz)	Hz
磁通(Magnetic Flux)	Φ	韦伯(weber)	Wb
磁通密度(Magnetic Flux Density)	B	特斯拉(tesla)	T

注：表中的电磁量将随着学习本书的进度加以说明。

虽然我们今天经常使用的是国际单位制，但一些非国际单位制仍然在使用（例如：电动机功率的单位偶尔用马来表示，有时候需将非国际单位制转换成国际单位制，可以利用表1-4的对应关系来转换。

表1-4 单位转换

量的名称	非国际单位制	乘以	国际单位制
长度(Length)	英寸(in)	0.0254	米(m)
	英尺(ft)	0.3048	米(m)
	英里(mile)	1.609	千米(km)
力(Force)	磅(lb)	4.448	牛顿(N)
功率(Power)	马力(hp)	746	瓦(W)
能量(Energy)	千瓦时(kW·h)	3.6×10^6	焦耳(J)
	英尺磅(ft-lb)	1.356	焦耳(J)

注：1焦[耳]=1牛[顿]米。

单位的定义

自从使用米制以来，米就被定义成从北极到赤道距离的一千万分之一，秒被定义为一平均光天的 $1/60 \times 1/60 \times 1/24$ 倍。后来，基于自然物理定律的更精确的定义被采用。如今，米被定义为光在真空中在 $1/299792458$ s时间内所传播的距离，而将铯原子133基态的两个超精细能级之间跃迁振荡9192631770周所经历的时间定义为铯原子钟的秒。将一个特定质量的铂-铱缸定义为千克的定义，该铂-铱缸现保存于法国的国际度量衡局。

单位间的相关性

根据表1-1和表1-4，我们对SI制及它们的大小有了基本的了解。例如：1米等于39.37英寸；所以1英寸等于 $1/39.37 = 0.0254$ 米或2.54厘米。1磅的力等于4.448牛顿，1牛顿就等于 $1/4.448 = 0.225$ 磅的力，即提起0.225磅重的物体所需要的力。物体克服1牛顿的力移动1米的距离所做的功就是1焦耳，相当于将0.225磅的重物提起1米高所做的功。将该重量在1秒之内提高到1米需要1瓦的功率。

在电路理论中我们将瓦特作为电功率的国际单位制。例如，一个电灯的额定功率为60

瓦, 烤面包机的额定功率为 1000 瓦。我们可以很容易地建立机—电单位之间的联系。对发电机来说, 输入机械功率产生电功率输出。如果发电机的效率为 100%, 那么输入 1 瓦的机械功率将产生 1 瓦的机械功率输出, 这就清楚地表明了机电系统之间的联系。

上面的例子可以看出机电设备用瓦特做额定功率的单位会很小, 而人力做功用瓦特表示却又很大。例如, 一个人平均一天 8 小时体力劳动的额定功率为 60 瓦, 恰恰足以供一个标准 60 瓦的电灯连续工作 8 小时。跟人比较起来, 一匹马做的功就多了。通过实验, 艾萨克瓦特得出一匹强壮的马拉车时的平均功率为 746 瓦。据此, 他定义此马力为 1 马力 (hp), 其值等于 746 瓦特, 并沿用至今。

1.3 词头

科学记数法和工程记数法

把一个数写成小数点左边只有一位数字乘以 10 的整数幂的形式叫做科学记数法。 2.47×10^5 就是用科学记数法表示的, 而 24.7×10^4 和 0.247×10^6 就不是用科学计数法表示的。工程记数法就是用一些词头表示 10 的某些次幂, 见表 1-5。因此, 0.055A 可以表示成 55×10^{-3} A, 而将其表示成 55mA 更可取一些。此处, 我们用词头来代替 10^{-3} 。常常选一个词头作为介于 0.1 ~ 999 之间的基数。所以, 2.5×10^{-5} s 可以表示为 25 μ s。

表 1-5 工程前缀

因 数	词 头 名 称	符 号	因 数	词 头 名 称	符 号
10^{12}	太[拉](tera)	T	10^{-3}	毫(milli)	m
10^9	吉[咖](giga)	G	10^{-6}	微(micro)	μ
10^6	兆(mega)	M	10^{-9}	纳[诺](nano)	n
10^3	千(kilo)	k	10^{-12}	皮[可](pico)	p

1.4 电路图

电路是由电池、连接线、开关、电阻、电容、晶体管等元器件构成的。当把电路画在纸上的时候, 我们就需要电路图了。本书使用三种图——框图、原理图和实物电路图。

框图

框图以简化了的形式来描述一个电路或系统。将整个问题分解成一些方框, 每个方框代表系统或电路的一部分。将各个方框加以标注说明它的功能及组成, 然后再将它们连接起来后说明彼此之间的关系。总的信号流程一般为从左到右、从上到下。音频放大器的框图如图 1-1 所示。尽管你还没有学习它的任何电路, 但你却很容易了解其大致的内容——送话器接收到声音以后, 将声音转换成电信号并通过两个放大器放大后输出给扬声器, 通过扬声器再将音频信号转换成声音。电源为本系统提供电能。

虽然框图能通过一个整体画面帮助我们容易地理解问题的大体性质, 但它却不能为我们提供细节。

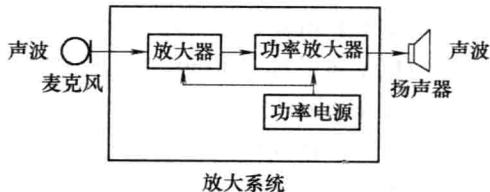


图 1-1 音频放大器框图

实物电路图

如果想知道细节就需要使用实物电路图，实物电路图能够提供细节。该类电路图用实物表示电路元件，使得电路及电路的工作过程更加直观。以图 1-2 所示电路为例，该电路用导线将电池、开关和灯泡连接起来。很容易看出电路是如何工作的，合上开关电池作为电源在电路产生电流而点亮灯泡。其中，电池被称为电源而灯泡被叫做负载。

原理图

尽管实物电路图具有直观的优点但也存在画图不方便的缺点。原理图通过采用简化的标准符号来表示电路元件，避免了画图不便的问题。这些简化的标准电路元件的符号见表 1-6（随着学习的不断深入我们会逐步理解这些符号的含义）。例如，图 1-3a 中通过采用表 1-6 中的一些符号来构建图 1-2 所示电路就得到了电路的原理图。电路中的所有元件都用相应的电路符号所代替。当然，我们应该针对不同的电路采用不同的电路符号。在图 1-3 中灯泡具有电阻，会阻碍电荷的通过。如果想强调灯泡阻碍电荷的性质，就使用电阻的符号（见图 1-3a）而不是使用如图 1-3b 所示的灯泡符号。

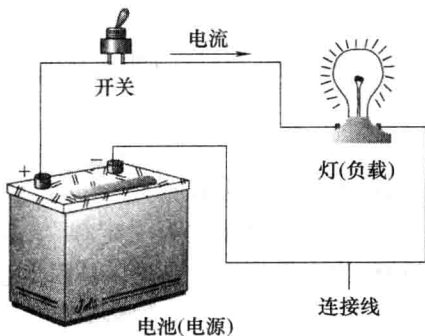
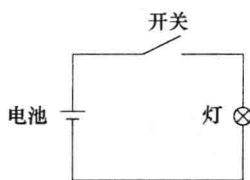
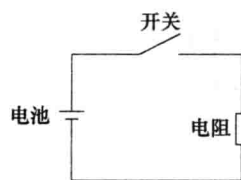


图 1-2 实物电路图



a) 用灯符号的原理图



b) 用电阻符号的原理图

图 1-3 图 1-2 的原理图表示

表 1-6 原理图电路符号

电池	交流电压源	电流源	固定 电阻器	可调 电阻器	固定 电容器	可调 电容器	空心 电感器	磁心 电感器
白炽灯	动作触点 中间断开的 双向触点	麦克风	扬声器	线连接	线交叉	接地 接机壳	熔断器	
断路器		电压表	电流表	变压器		受控源		

1.5 电压和电流

图 1-4 所示电路由导线将电源、开关和负载相互连接起来构成。当开关闭合时, 电路中的电流将点亮灯泡。这一电路是我们在实际中见到的包括手电筒、汽车前灯系统等普通电路的代表。学习该电路能够帮助我们理解电压和电流。

基本原子理论表明如图 1-4 中的电流实际上是电荷流。使电荷流动的原因是电源电压的存在。图 1-4 中的电源是一块电池, 但在实际工作中它可以是发电机或太阳电池等。

理论方程式

在本节中首先遇到的是用来描述电路理论关系的方程和公式。如果对基于电路理论的原理和概念理解的很清楚的话, 我们就能很容易地记住这些公式。正如我们所知道的, 公式只能通过实验、下定义和数学推导三种方式之一得到。

实验公式

电路理论以一些基本实验结果为基础, 这些实验结果不能用其他方法来证明, 它们的有效性只是由于实验已经证明了它们是正确的。这些最基本的实验结论被称为“定律”, 例如, 欧姆定律、基尔霍夫定律和法拉第定律等。一个公式被称为定律或实验定律, 是因为它们是以实验为基础的, 无法通过其他方法得到。

定义公式

通常公式都是由下定义得来的, 如一分钟有 60 秒是因为我们已经定义一秒等于 $1/60$ 分钟。所以, 我们就有了公式 $t_{\text{sec}} = 1/60 t_{\text{min}}$ 。

导出公式

导出公式或等式是通过合并或对其他公式进行数学变换而得来的。与其他两种公式不同, 数学是得到导出公式的唯一方法。

分辨电路理论公式为哪一类公式对我们来说是非常重要的。这种意识一方面能够帮助我们加深对公式的理解和记忆, 另一方面还能帮助我们理解电路理论的基础——电路理论依赖的基本实验前提, 得到的重要定义和将这些基本思想连接起来的方法。

导体、绝缘体和半导体

物质的原子结构影响电荷(如电子)在物质中的移动及如何应用在电学上。在电学上我们把物质分为导体、绝缘体和半导体三类。

导体

内部容易形成电流的材料被叫作导体。金属是我们最熟悉的导体, 在良导体中有大量的自由电子能够自由地移动。正如我们所知, 银、铜、金和铝都是良导体, 在这些金属中铜用的最为广泛。铜不但是良导体而且价格低廉易于做成导线, 这使得铜得到了广泛的应用。

虽然铝的导电性只有铜的 60%, 但由于重量轻也被大量使用, 主要用于架空线路。普

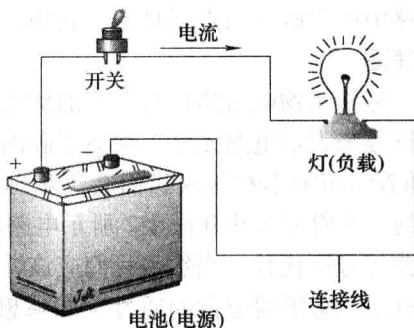


图 1-4 基本电路

遍使用银线和金线成本会很高。不过,由于金线抗氧化性比其他材料好,所以常被用于特殊的场合。例如,由于金线比其他材料连接的更加可靠,一些关键的电气连接用金线完成。

绝缘体

在正常条件下不允许电流流过的材料被称为绝缘体(如玻璃、陶瓷、塑料、橡胶和纸等)。例如,照明线的绝缘包皮就是绝缘体。该绝缘体用来防止与金属接触而保护我们免于触电。

绝缘体不导电的原因是绝缘体具有完全的或近似完全的价电子层,所以自由电子被紧紧地束缚住了。但是当施加足够高的电压时,电子受到足够大的力会挣脱原子核的束缚使绝缘破坏而形成导体。你看到空气中的电弧或者闪电,及绝缘烧焦形成固体就是这种现象。

半导体

如硅和锗那样的材料具有半价电子层,它们既不是良导体也不是绝缘体,这样的材料被称为半导体。半导体的这一特殊属性对电子工业来说非常重要。

晶体管、二极管、集成电路和其他电子设备都是用硅制造的。半导体是诸如个人计算机、录像机、便携式音碟机、计算器等电子产品必需的材料。有关半导体知识将在模拟电子课程中详细讲解。

1.6 电荷的单位

库仑(全名:Charlse-Augustin de Coulomb 1736—1806),法国工程师、物理学家。1736年6月14日生于法国昂古莱姆。1806年8月23日在巴黎逝世。

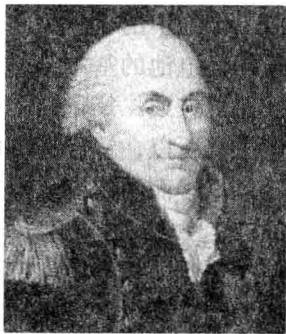
库仑早年就读于美西也尔工程学校。离开学校后,进入皇家军事工程队当工程师。法国大革命时期,库仑辞去一切职务,到布卢瓦致力于科学研究。法皇执政统治期间,他回到巴黎成为新建的研究院成员。

1773年,库仑发表有关材料强度的论文,所提出的计算物体上应力和应变分布情况的方法沿用到现在,是结构工程的理论基础。1785—1789年,用扭秤测量静电力和磁力,导出著名的库仑定律。库仑定律使电磁学的研究从定性进入定量阶段,是电磁学史上一块重要的里程碑。

库仑(电荷的单位)就是以他的名字命名的。

电荷的单位是库仑(C)。载有 6.24×10^{18} 个电子的电荷被定义为1库仑。也就是说,当中性导体中有 6.24×10^{18} 个电子被移除将会留下1库仑的正的净电荷,即 $Q = 1\text{C}$ 。相反,一个充电的物体中增加 6.24×10^{18} 个电子就会产生1库仑的负的静电荷,即 $Q = -1\text{C}$ 。不过,我们对流过导线的电荷更感兴趣。为此,当 6.24×10^{18} 个电子流过导线时,我们认为流过导线的电荷为1C。

所以,我们说一个电子上的电荷等于 $1.60 \times 10^{-19}\text{C}$,即 $Q_e = 1/(6.24 \times 10^{18})\text{C} = 1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ 。



1.7 电压

伏特（全名：Alessandro Antonio Volta，1745—1827）；意大利物理学家，发明了电池电容器。电池是最早提供连续电流的装置。

伏特出生于意大利科莫的一个贵族家庭。伏特 18 岁便开始了电路实验。1796 年他发明的电池使电的使用产生了革命性的变革。1800 年他发表的著作标志着电路理论基础的确立。伏特一生中获得了诸多殊荣。

伏特（电压或电位差的单位）就是以他的名字命名的。

如果电荷从物体上被脱离下来并且从一点转移到另一点，在这两点之间便产生了电位差或电压。电压存在于我们生活的各个方面，当我们走过地毯时就会产生电压，该电压完全是正负电荷相分离的结果。

当雷电风暴发生时雷云中的电子在气流的作用下脱离原子的束缚被吹到云层的底部，正电荷留在了云层顶部，负电荷留在了云层的底部。接下来排斥力驱动电子离开云层的底部，在地面上留下正电荷，这样便产生了几百万甚至上亿伏的电压。

实际电压源

从前面的例子我们知道当正负电荷被分开时便产生了电压。不过，静电的放电和雷电并不是实际的电源。我们日常生活中使用的电池是一种实际的电源。电池中的化学力将正负电荷分开。图 1-5 说明了一个普通碳性电池的基本结构。碳棒作为内电极，锌皮作为外电极。氯化铵或二氧化锰粘剂与锌壳之间的化学反应产生过量的电子，所以，锌带有负电荷。随着反应的交替进行，碳棒上缺乏电子而使碳棒上带有正电荷。分开的电荷在两个电极之间产生 1.5V 的电压。电池的应用十分广泛，它能做许多有用的工作，例如用它点亮电灯等。

电压的定义

电路中单位正电荷在电场力的作用下由一点移动到另一点所做的功被定义为电压。一般情况下，分开电荷所需的电能取决于产生的电压和移动电荷的多少。根据定义，如果把 1C 的电荷从一点移动到另一点需要的电能为 1J，那么两点之间的电压为 1V。用公式表示如下：

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-1)$$

式中， W 为所需的电能，单位为焦耳（J）； Q 为电荷，单位为库仑（C）， U 为电压，单位为伏特（V）。

由于电压是在两点之间定义的，例如，电池的电压发生在它的两极之间。所以，电压自身不能孤立存在于一点，其总是相对于其他点而存在的。因此，电压也叫电位差。我们还要注意的虽然是在做功方面考虑的静电，尽管电荷分开方式不同，但都能得到相同的结论，电池是通过化学方式分离电荷的，发电机是通过机械方式而太阳电池是靠光电方式来分离电

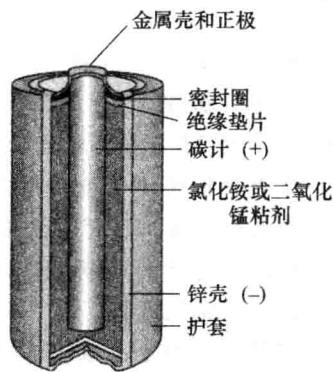


图 1-5 碳性电池的基本结构

荷的等。

式(1-1)中正式的电压定义有点抽象。更好的方法是将电压看成是电路中移动电荷所需要的力。更加详尽的观点会在本章第10节的开头见到,在这一节中我们会学习欧姆定律。不过,此时我们还得采用式(1-1),该式非常重要,它为许多重要的电路关系提供了理论基础。

直流电压源符号

流动的电荷称为电流。因为电池的极性不发生改变,所以电流将保持同一个方向。此单方向的电流叫做直流,简称为DC,电池叫做直流电源。电池的符号如图1-6所示。图中长线代表正极,在实际电池上正极经常用+号表示,负极用-号表示。

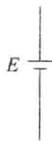


图1-6 电池符号

1.8 电流

安培(全名:André Marie Ampère, 1775—1836),法国数学家和物理学家,电动力学基础的奠基人。1820年,他定义了电流并研究出测量电流的方法。

安培出生于法国的里昂。他非常爱好数学,在他12岁时,只用几个星期就掌握了拉丁文。安培写了很多著作,他推导出许多电磁学的定律,发明了电磁铁和安培表。

安培(电流的单位)就是以他的名字命名的。

正如你所知道的那样在像铝那样的金属中有许多自由电子,这些电子在材料中的移动是杂乱的,它们在已知方向上的净移动量为零。但是当电子在电源的驱动下沿着一定方向移动时会形成电荷流,这一电荷流被称为电流。单位时间内通过电路的电子越多电流就越大。所以,电流是电荷流或电子流对时间的变化率。



电流的定义

因为电荷的单位为库仑,电流是每秒变化的库仑,所以,在国际单位制中将每秒1库仑定义为1安培(A)。根据定义,我们获知1A就是电路中1s内流过某一点的电荷量为1C时的电流。用大写字母*I*作为电流的符号。公式如下:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

式中,*Q*为电荷,单位为库仑(C),*t*为时间间隔,单位为秒(s);*I*为电流,单位为安培(A)。要知道式(1-2)中时间*t*不是离散的时间点而是电荷移动的时间间隔,这一点很重要。

作为电流的理论定义,式(1-2)非常重要,但在实际当中从未用该式进行电流的测量,而是常用被称为安培表的仪器来测量电流。尽管如此,该式仍然极其重要,后面我们会用该式进行其他关系的推导。

电流方向

在使用电的早期,人们认为电流是由正电荷的移动形成的,并认为这些正电荷是沿着电路从电源的正极流向负极,如图1-7a所示。此方向也叫做惯用电流,以此为根据,建立起了所有的定律、公式和电路理论符号。然而,当发现物质的原子属性之后,人们才知道在金

属导体中实际是带负电荷的电子在移动,且电子的移动方向是从电源的负极流向电源的正极。如图 1-7b 所示,这一方向被叫作电子流方向。由于惯用电流方向已被很好地建立并被人们所习惯采纳,现在大多数使用者仍然采用它,当然我们也不例外。所以,我们在此书中也采用惯用电流方向作为电流的方向。

交流 (AC)

交流与直流不同。在我们向下进行之前,先介绍一下交流。交流是指方向随时间呈周期性变化的电流,例如,电荷在电路里流动的方向交替发生变化,先沿一个方向流动然后沿另一方向流动。我们最熟悉的交流电源是为每个家庭提供电能的交流电力系统。

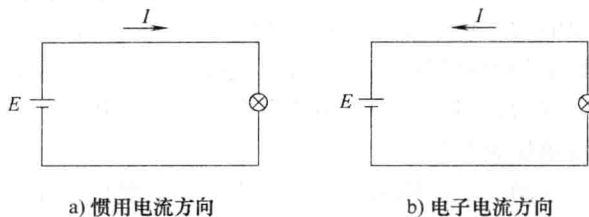


图 1-7 惯用电流方向与电子电流方向对照图

1.9 电阻

在前几节中我们已经学习了电压和电流的概念,也知道了电流与电荷的移动有关。在导体里外加电源的电压使自由电子移动。当自由电子在材料中移动时会不断地与原子和导体中的其他电子相碰撞。电子在移动过程中,电子以热的形式将它们的一些能量释放出来。这些碰撞抵抗电荷的运动被称为电阻。当施加的已知电压不发生变化时,电阻越大电流会越小。

电阻器作为电路元件的一部分经过特殊的设计具有电阻,并几乎用在所有的电路里。电阻尽管在电路里是一个简单的元件,但它在确定电路的运行方面起着非常重要的作用。电阻用符号 R 来表示(见图 1-8),电阻的单位为欧姆 (Ω)。

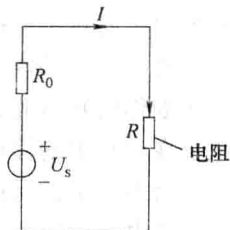


图 1-8 基本电阻电路

本节我们学习各种形式的电阻,先从金属导体开始,研究影响电阻的因素。然后再研究包括不变电阻和可变电阻在内的各种商业电阻。接下来我们讨论非线性电阻设备并对超导特性及其使用得出概括的结论。

欧姆 (全名: Georg Simon Ohm, 1787—1854), 德国物理学家。1826 年欧姆由实验得出最基本的表述电压、电流、电阻三者之间关系的欧姆定律。他的这些工作最初曾不被某些批评者所接受。

欧姆出生于巴伐利亚的埃尔兰根,有着艰辛的童年,欧姆一生从事电学的研究,建立了著名的欧姆定律。1841 年,伦敦皇家学院授予他 Copley Medal 奖。1849 年,慕尼黑大学授予他物理学首席教授职位。欧姆 (电阻的单位) 就是以他的名字命名的。



导体的电阻

如前几节所述,导体允许电荷通过,但导体的表现不总是这样。通过研究我们发现材料的电阻由许多元素来决定,材料的种类、导体的长度、导体的截面积和导体的温度都是决定导体电阻的因素。

如果电流流过一定长度的导线,移动的电子将与同一材料内的其他电子相碰撞。由于不

同材料的原子结构不同,引起电子的碰撞不同,对电阻的影响也就不同。对相同尺寸规格的铜线和铝线来说,由于铜比铝有更多的自由电子,所以铜线的电阻要比铝线的电阻小得多。因此,我们得出以下结论:导体的电阻由材料的种类来决定。

如果我们将导线的长度增加一倍,我们会预想到在这2倍长度的导线中电子的碰撞次数也会是先前的2倍,所以,引起的电阻也会是先前的2倍。据此,我们可知:金属导体的电阻与导体的长度成正比(导体越长,电阻越大)。

导体的电阻还取决于导体的横截面积,如果横截面积增大了,那么电子就比以前横截面积没有增大时通过导体自由多了,就像水在大口径水管里流动要比在小口径水管里流动更自由一样。同样长的导线如果将横截面积增加一倍,那么电子在该导线中的碰撞几率就会降为原来的一半。据此,我们可知:金属导体的电阻与导体的横截面积成反比(导体越细,导体的电阻就越大)。

在已知温度下决定导体电阻各因素的数学表达式如下:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (1-3)$$

式中, ρ 为电阻率,单位为欧姆米($\Omega \cdot \text{m}$); l 为导体的长度,单位为米(m); A 为导体的横截面积,单位为平方米(m^2)。小写希腊字母 ρ 为比例常数,被称为材料的电阻率。

电阻分类

虽然在电气和电子应用中会使用各种类型和尺寸的电阻,但电阻主要被分成两大类:固定电阻和可变电阻。顾名思义,所谓固定电阻就是电阻值恒定不变的电阻。固定电阻有许多类型,小到用显微镜才能看到(用于集成电路);大到大功率电阻,其能消耗许多瓦特的电功率。图1-9所示为常见的碳膜合成电阻的基本结构。

如图1-9所示的碳膜合成电阻是由碳芯和绝缘填料混合而成。电阻器的电阻值取决于碳对填料的配比,碳的比例越大电阻值就越小。金属引线与碳芯相连接,然后用绝缘的涂层将整个电阻器封装起来。我们可以得到电阻值范围从小于 1Ω 到 $100\text{M}\Omega$,功率从 $1/8\text{W}$ 到 2W 的碳膜合成电阻。不同尺寸的电阻如图1-10所示。图中电阻的功率由左至右依次为 2W 、 1W 、 $1/2\text{W}$ 、 $1/4\text{W}$ 、 $1/8\text{W}$,大电阻消耗的功率比小电阻多。

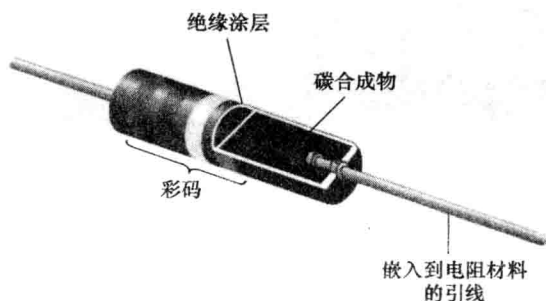


图 1-9 碳膜合成电阻的基本结构

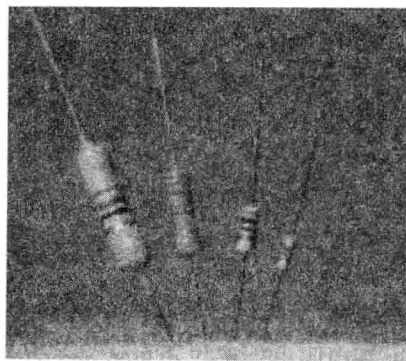


图 1-10 碳芯电阻的实际规格

碳芯电阻虽然具有价格低廉且容易生产的优点,但其也存在着容差大和由于温度的变化阻值变化范围大的缺点。当温度变化 100°C 时,碳芯电阻的阻值会变化5%,如图1-11所示。