

电工理论



主 编 王乃厚
副主编 杨书贞
吴学伍
朱鸣宇

中国科学技术大学出版社

电 工 理 论

主 编 王乃厚
副主编 杨书贞 吴学伍 朱鸣宇
编 委 王乃厚 杨书贞 吴学伍 朱鸣宇
 卢胜 郭教之 乐群 徐冉 刘学军
主 审 朱安常 徐丽玉

中国科学技术大学出版社

1999·合肥

内 容 简 介

《电工理论》教材是根据军队院校电工课程的教学需求编写的,全书共十二章,包括:绪论、电路的基本概念与基本定理、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、非正弦交流电路、电路的暂态过程、变压器、三相异步电动机、直流电机、继电器接触器控制电路、控制电机、供电与安全用电。

本书内容丰富,选材新颖,覆盖面广,应用突出。可作为军队院校、高等工业院校非电专业电工技术课程(50~60学时)的教材和电视大学、函授教育和职工培训的教学用书和参考书,也可作为工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电工理论/王乃厚等编著.—合肥:中国科学技术大学出版社,1999.7
ISBN 7-312-00927-1

I.电… II.王… III.电工-理论 IV.TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 40834 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)
合肥晓星印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:13.75 字数:335 千
1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷
印数:1—7000 册
ISBN 7-312-00927-1/TM·9 定价:18.00 元

2/31/32

前 言

《电工理论》,《模拟电子技术》,《数字电子技术》是非电专业的重要技术基础课。为了适应我国社会主义现代化建设和高等教育事业的发展,反映现代文化科技的先进水平,贯彻落实军队新时期教育方针,根据国家教委制定的高等工科院校非电类电工学课程教学的基本要求编写了本套教材。

在《电工理论》教材的编写过程中,我们注重反映教学改革的新经验和科研新成果,提高教材的思想性,科学性,启发性,适用性和先进性。结合军队和地方院校的教学实际情况,注意取材内容的更新,既要突出重点概念,又要联系实际应用,把重点放在分析问题和解决问题的能力上,在问题的阐述上力求循序渐进,通俗易懂,条理清楚,使教材显示出鲜明性和生动性,做到既便于教学又便于能力的培养。

本书由蚌埠坦克学院、合肥炮兵学院发起,武汉二炮指挥学院、郑州高炮学院、徐州空军后勤学院、南京炮兵学院等六所院校联合编写。并于一九九五年十二月在蚌埠坦克学院召开了第一次编委会议,经过充分协商,确定了编写教材的指导思想和原则,制定了纲目。成稿后经主编统审,集体初审,专家审阅,最后在广泛听取各方面意见的基础上,由王乃厚*、朱鸣宇、杨书贞同志定稿。

合肥炮兵学院的朱安常副教授,徐州后勤学院的徐丽玉教授担任主审。在编写出版的过程中,得到各兄弟院校的领导和所在教研室的同志以及湖南省水利水电厅的关心、支持与帮助,在此谨表谢意。

由于编者水平有限,难免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编者
1997年2月

* 王乃厚同志为本套教材的发起与组织者之一,原为蚌埠坦克学院实验中心主任、副教授,1996年转业到湖南省水利水电厅工作。

目 录

前言	I
0 绪论	1
1 电路的基本概念与基本定律	3
1.1 电路的模型及组成	3
1.2 电流和电压的参考方向	4
1.2.1 电流的参考方向	4
1.2.2 电压的参考方向	5
1.2.3 关联参考方向	5
1.3 电功率与额定值	6
1.4 电路元件	6
1.4.1 无源元件	6
1.4.2 电压源和电流源	12
1.4.3 受控源	16
1.5 克希荷夫定理	17
1.5.1 克希荷夫电流定律	18
1.5.2 克希荷夫电压定律	19
1.6 电路中电位的计算	20
习题	21
2 电路的分析方法	26
2.1 支路电流法	26
2.2 回路电流法	28
2.3 节点电压法	31
2.4 叠加原理	36
2.5 戴维南定理和诺顿定理	39
2.5.1 戴维南定理	39
2.5.2 诺顿定理	41
2.6 含受控源电路的分析方法	42
习题	45
3 正弦交流电路	48
3.1 正弦电压与电流	48
3.1.1 参考方向	48
3.1.2 正弦量的三要素	49
3.1.3 相位差	49

3.1.4	有效值	50
3.2	正弦量的相量表示法	52
3.2.1	相量与相量图	52
3.2.2	克希荷夫定律的相量形式	55
3.3	单一元件的交流电路	56
3.3.1	电阻元件	56
3.3.2	电感元件	57
3.3.3	电容元件	58
3.4	复阻抗与复导纳	60
3.4.1	复阻抗	60
3.4.2	复导纳	62
3.4.3	复阻抗(导纳)的串并联	63
3.5	正弦交流电路的分析计算方法	65
3.5.1	电路的相量模型	65
3.5.2	正弦交流电路的分析计算方法	65
3.6	正弦交流电路的功率	71
3.6.1	功率	71
3.6.2	功率因素的提高	74
3.7	谐振	75
3.7.1	串联谐振	76
3.7.2	并联谐振	79
3.8	互感电路	81
3.8.1	互感系数	81
3.8.2	同名端	81
3.8.3	具有互感的正弦电路	83
	习题	85
4	三相交流电路	90
4.1	三相电源	90
4.2	三相电路的连接	91
4.2.1	三相电源的连接	92
4.2.2	三相负载的连接	94
4.3	三相电路的计算	95
4.3.1	对称三相电路的计算	95
4.3.2	不对称三相电路的计算	99
4.4	对称三相电路的功率	102
	习题	105
5	非正弦周期电流的电路	108
5.1	非正弦周期量的分解	109
5.2	非正弦周期量的有效值	112

5.3 非正弦周期电流电路的谐波分析法	114
习题	117
6 电路的暂态过程	119
6.1 换路定则	119
6.1.1 换路定则	119
6.1.2 初始值的确定	120
6.2 RC 电路的响应	121
6.2.1 RC 电路的零输入响应	121
6.2.2 RC 电路的零状态响应	124
6.2.3 RC 电路的全响应	126
6.3 三要素法	128
6.4 微分电路与积分电路	130
6.4.1 微分电路	130
6.4.2 积分电路	132
6.5 RL 电路的响应	133
6.5.1 RL 电路的零输入响应	133
6.5.2 RL 电路的零状态响应	135
6.5.3 RL 电路的全响应	136
习题	137
7 变压器	140
7.1 变压器的结构与工作原理	140
7.1.1 变压器的结构	140
7.1.2 变压器的工作原理	141
7.1.3 变压器的损耗和效率	146
7.1.4 变压器的使用	146
7.2 三相变压器与特殊变压器	147
7.2.1 三相变压器	147
7.2.2 特殊变压器	149
习题	151
8 三相异步电动机	153
8.1 三相异步电动机的结构	153
8.1.1 定子	153
8.1.2 转子	154
8.2 三相异步电动机的工作原理	154
8.2.1 旋转磁场	154
8.2.2 工作原理	157
8.3 三相异步电动机的转矩和机械特性	158
8.3.1 三相异步电动机的电路分析	158
8.3.2 电磁转矩	159

8.3.3	机械特性	160
8.4	三相异步电动机的起动与制动	161
8.4.1	起动	161
8.4.2	制动	164
8.5	三相异步电动机的调速	166
8.6	三相异步电动机的选择	167
8.6.1	三相异步电动机的铭牌数据	167
8.6.2	三相异步电动机的选择	168
8.7	单相异步电动机	169
8.7.1	电容分相式电动机	171
8.7.2	罩极式电动机	171
	习题	172
9	三相异步电动机的继电器接触器控制电路	174
9.1	常用控制电器	174
9.1.1	组合开关	174
9.1.2	按钮	174
9.1.3	交流接触器	175
9.1.4	中间继电器	176
9.1.5	热继电器	176
9.1.6	熔断器	177
9.1.7	自动空气断路器	178
9.2	三相异步电动机的转动与连续运行控制电路	178
9.2.1	鼠笼式电动机直接起动的控制电路	178
9.2.2	鼠笼式电动机正反转的控制电路	181
	习题	182
10	直流电动机	183
10.1	直流电动机的构造	183
10.2	直流电动机的基本工作原理	184
10.3	并励电动机的机械特性	186
10.4	直流电动机的使用	188
10.4.1	电动机的起动与反转	188
10.4.2	并励(他励)电动机的调速	189
	习题	191
11	控制电机	193
11.1	伺服电动机	193
11.1.1	交流伺服电动机	193
11.1.2	直流伺服电动机	196
11.1.3	应用实例	197
11.2	测速发电机	198

11.2.1	交流异步测速发电机	198
11.2.2	直流测速发电机	200
11.2.3	测速发电机的应用实例	200
11.3	自整角机	201
11.3.1	自整角机的结构	201
11.3.2	自整角机的分类	201
11.3.3	控制式自整角机	202
11.3.4	力矩式自整角机	202
11.3.5	自整角机的应用实例	203
	习题	204
12	供电与安全用电	205
12.1	发电、输电、配电概述	205
12.1.1	供电系统	205
12.1.2	供电线路(配电)	205
12.2	导线截面积选择	207
12.2.1	按安全载流量选择	207
12.2.2	按机械强度条件选择	207
12.2.3	按允许电压损失选择	207
12.3	保护接地和保护接零	208
12.3.1	保护接地	208
12.3.2	保护接零	209
	习题	210

0 绪 论

1819年奥斯特对电磁感应的实验和此后的欧姆定律、电磁感应定律、焦耳-楞次电流热效应定律、克希荷夫定律等基础理论的创建,为电工技术理论的发展奠定了基础。1834年第一台电动机的问世,把电能的利用推进到一个新的阶段。

电能的应用引起了“第二次工业革命”,在这以后的几十年中,各种电气设备和电器产品层出不穷、更迭峰起,电能的应用遍及城乡的各行各业,在工业方面(如机械工业、冶金工业、化学工业等),绝大多数生产机械(如起重机、机床、电镀、轧钢机、机械制造设备以及各种泵、鼓风机、压缩机等)都是以电力作为动力源;现代国防、科研、农业以及人们日常生活都离不开电能,可以说,电能的应用无处不在,电能为人类社会的物质文明和精神文明带来了不可估量的价值。

电能具有便于生产、便于运输、便于转换、便于控制等众所周知的优点,因此,越来越受到人们的重视。

1. 为了满足人类对电能的需求,人们通过多种途径生产更多的电力。如火力发电(利用煤、石油、沼气等)、原子能发电、水力发电、太阳能发电、风力发电、潮汐发电等。

2. 电能的传输具有迅速、高效、便于分配和远距离输送等优点,所以得到了广泛的应用。

3. 电能可以方便地转换为机械能、热能、化学能等,同样其他形式的能量也可以方便地转换为电能。另外,电能本身还可以进行转换,如应用整流二极管或晶闸管元件能将交流电转换为直流电能;直流电能还可以转换为交流电能,如直流电动机拖动的电力机车,正常行驶时,晶闸管元件起整流作用,将电网的交流电能经整流转换为直流电能,供给电机;而当机车下坡行驶时,直流电动机将处于发电状态,将机车下坡时放出的能量通过电动机变为直流电能,再经过晶闸管元件转换为交流电能送回电网。通过变频电路还可以将频率固定的交流电能或直流电能转换为频率和电压均可变的交流电能等等。

值得一提的是非电量与电量之间的转换。如位移、速度、加速度、力、温(湿)度、声、光、X射线、气体等都可以通过传感器转换为电压、电流、(电)频率和(电)脉冲等各种模拟或数字信号,这在工程技术中有特别重要的意义。

本世纪90年代以来,电工技术的基本理论逐步发展到比较成熟和完善的阶段,而电工技术与其他各种学科的互相交叉、互相渗透、互相促进是现代科学技术发展的一个重要特征。电工技术为仪表测量、通信工程、自动控制、计算机工程等学科奠定了理论基础,半导体产品、计算机的不断更新换代、各种高科技新产品的问世就是充分的证明;这些学科和设备的发展又进一步促进了电工技术理论的发展,例如,现在人们可以利用计算机技术去研究大规模网络理论、非线性电路、分布参数系统、电磁场理论等人工计算难以胜任的工作。

《电工理论》是研究电的基本规律和电能的应用的一门科学,它也是一门实用性很强的学科。各种工业电气设备的运行、维护、安装调试等工作都离不开理论的指导;军事通信系

统、指挥自动化系统、武器装备训练模拟系统、导弹制导、人造卫星姿态控制等国防、军工部门的设备和技术方面的问题无一不是与电能的应用密切相关。特别是电工技术及其关联学科的发展,导致了微型处理机的出现,微型计算机的体积越来越小、功能越来越强、价格不断下跌,使其普遍应用成为可能。这使航天技术、生物医学、材料力学、探测技术、办公室自动化、工业生产的集约化现代化管理等方面发生了变革性的突破与进展,计算机技术已成为工业发展的第一生产力。可以预料,计算机技术的发展将会使测量仪表的智能化水平不断提高,会使自动化系统具有自学习、自组织、检错与纠错等高级智能,从而取代传统的设备,使生产效率和产品质量大大提高,也必将使电工技术发展到一个新水平。

电工技术的发展以及电能的广泛应用,对我国的四个现代化建设事业起着举足轻重的作用,与人们生活水平的提高也息息相关。

应当说明的是,电工技术的内容涉及面很广。本书按两个方面来讲述:第一,电路基础部分。重点介绍电路的基本概念和分析方法,包括电路模型、基本定律、电位计算;直流、交流电路的分析方法;过渡过程等。第二,电机和继电接触器控制部分。包括各种变压器、电动机的选择和使用方法;低压电器与继电器、接触器的控制电路与接线等。以上内容是非电专业了解有关电工技术应用的主体内容。

《电工理论》这门课程是非电专业应当掌握的一门重要基础课。除了深入理解书中介绍的基本概念与设备原理以及一般电路的分析方法和学会选择电机、电器元件外,还必须通过实践培养分析、解决问题的能力,锻炼理论与实践相结合的能力。这对于学好其他课程和工作带来方便不无裨益。

1 电路的基本概念与基本定律

电是能量和信息的良好载体。为了实现电能和电信号的产生、传输及使用,人们往往将若干电气元件按特定的要求连接起来,构成“电路”。因此,电路是为了实现一定目的而连接起来的若干电气元件的集合。

1.1 电路的模型及组成

我们在理论上对电路进行研究时,首先遇到的是如何表示实际电路的问题。由于实际电路是由一个个实际元件所组成的,因此如何表示实际电路的问题就归结为如何表示实际元件的问题。

实际元件往往具有电的与磁的多方面效应,如果要将其同时完全地表示出来,可能会使问题变得十分复杂以致研究工作难以进行。为此,需要考虑如何根据一定的要求近似表示实际元件问题。解决的方法是首先定义若干种理想化的基本元件,使得任何一个实际元件都可以按照一定的要求由这些理想化元件联接而成的模型来近似表示。从而,任何实际电路也可用理想化元件做成的电路模型来近似表示。这样极大的方便了对电路的研究。今后除非另外特别说明,本书所说的电路都是指实际电路的电路模型,简称电路。

实际电路种类繁多,不胜枚举,其中存在着各种形式能量之间的转换,如电场能与磁场能、热能、声能及化学能之间的转换。为了刻画电能和其他能量之间转换的特性,我们用电源和负载的概念来说明。实际电路中的各种电气元件可以按照它们在电路中的作用分为如下三类:

1. 电源

电源是产生电能或信号的设备。它可以将其他形式的能量转换成电能;可以将一种波形的信号转换成另一种波形的信号。

2. 负载

负载是使用电能或接收信号的设备。与电源相反,负载是将电能转换成其他形式的能量。在现代日趋复杂的各种电路中,负载和电源都应更应被视作广泛而相对的概念,例如电视接收机中,某一级放大电路对于它的前一级放大电路而言可看作为负载,而对于它的后一级电路则又可被看作为电源。

3. 中间环节

中间环节是把电能或信号从电源传输到负载的设备。它可以简单(如二根导线),也可以是一个具有极其复杂的控制功能的传输网。

可见,一个完整的电路应包括电源、负载和中间环节三个基本部分。以图 1.1.1 为例,它既可以用来表示较为简单的手电筒实际电路,也可以用来表示较为复杂的电力线路和电

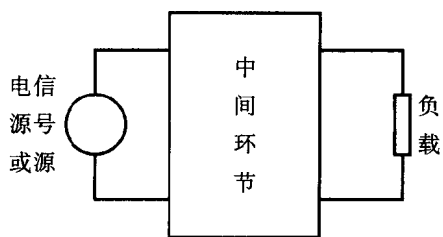


图 1.1.1 电路的组成

视接收机的实际电路。

电工理论是在电路模型的基础之上建立起来的。只要电路模型建立得足够正确,则通过电路模型的研究所获得的结论就能足够正确地反映出实际电路中所出现的情况。

本书的主要内容是电路分析,即在已知电路的连接以及元件参数条件下分析电路中各处的电流、电压和功率。电路分析是电工理论的重要组成部分,是今后进一步学习电子应用技术的基础。

1.2 电流和电压的参考方向

电工理论中一般选用电流和电压作为基本变量对电路的工作状态和元件特性进行定量描述。

1.2.1 电流的参考方向

电荷有规则的运动这一物理现象称为电流。通常用物理量电流强度 $i(t)$ 来衡量电流的强弱。电流强度 $i(t)$ 定义为单位时间内通过某一导体横截面的电荷量,即

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

电工理论中电流强度简称为电流。它是时间的函数。图 1.2.1 示出几种常见波形的电流。

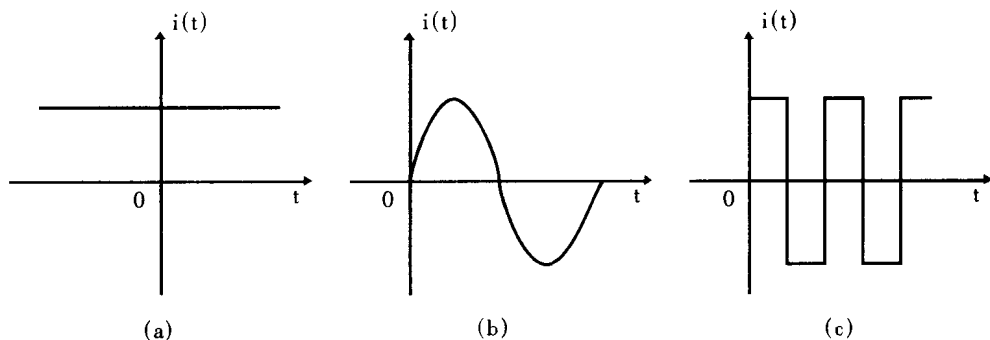


图 1.2.1 几种常见波形的电流

本书约定用小写字母 $i(t)$ 或 i 表示随时间变化的电流,用大写字母 I 表示大小和方向都不随时间变化的电流。

我国计量标准规定电流的单位是安培,简称安(A)。一秒内通过某一导体横截面的电荷量为—库仑时,电流大小为 1 安培。此外还辅之以千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等不同量级的计量单位,它们之间的转换关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

由于历史的原因,我们规定电流的方向即正电荷运动的方向。

为了定量计算的需要,常常要在电路中标明电流的实际流向。但是,比较复杂一些的电路往往很难事先判断电流的实际流向,加之有些电路中的电流本身是不断变化的。为此,在电路分析中,需要引入“参考方向”的概念。参考方向是指事先任意选定的方向。例如在图 1.2.2 中,对于电流量 $i(t)$ 可以事先任意设定其流向如箭头所示,使其成为一个代数量。当

$i(t) > 0$ 时,表明电流的实际流向与箭头所示的参考方向一致;当 $i(t) < 0$ 时,表明电流的实际流向与参考方向相反。这样,尽管这种事先设定的参考方向带有任意性,靠其本身并不能断定电流的实际流向,但是,参考方向连同该电流变量值的正负性却可确定电流的实际流向。

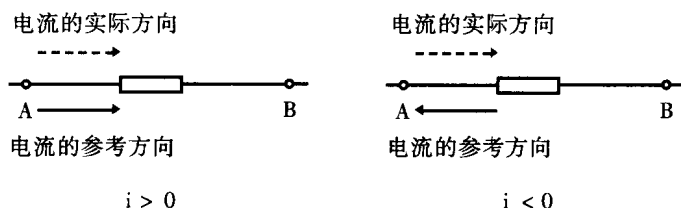


图 1.2.2 电流的参考方向

1.2.2 电压的参考方向

电压是从能量方面表示电场作功能力的物理量。单位正电荷在电路中从任意的一点 A 移动至另一点 B,电场力所做的功定义为 AB 两点间的电压,记作 $u(t)$ 。电压 $u(t)$ 一般也是时间的函数。与电流一样,也约定用小写的 u 或 $u(t)$ 表示随时间变化的电压,用大写 U 表示不随时间变化的电压。

规定电压的单位为伏特,简称伏(V)。如果电路中两点间的电压为 1 伏,则表示电场力将一库仑电量从其中一点移到另外一点所做的功为一焦耳。除了伏特之外,尚有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μV)等辅助单位,转换关系为

$$1 \text{ 千伏} = 10^3 \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 毫伏} = 10^{-3} \text{ 伏}$$

$$1 \text{ 微伏} = 10^{-6} \text{ 伏}$$

电压的方向规定为电位降的方向。与电流一样,在此后的电路分析中,电路图中所标的电压方向也是参考方向。电压的参考方向与实际方向一致时,电压为正值;不一致时为负值,如图 1.2.3 所示。图中还示出了本书常用的电压参考方向的两种标记方法:箭头法和 +、- 号法。

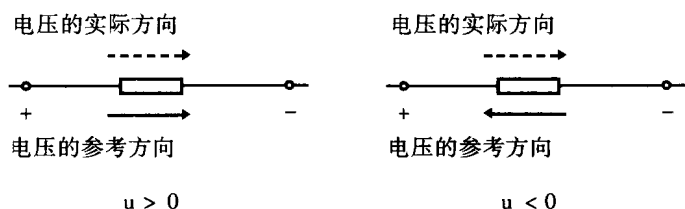


图 1.2.3 电压的参考方向

1.2.3 关联参考方向

前已指出,电流和电压的参考方向是可以事先任意设定的。但为了方便,常常把同一个元件上的电流参考方向和电压参考方向取成一致。这样,在一个元件上只要预先设定电压或电流中任一参考方向,则另一个的参考方向也就隐含确定。这一原则称为关联参考方向。

1.3 电功率和额定值

电功率是电路中一个重要的物理量。设图 1.3.1 是任意一个电路元件, $i(t)$ 是通过该元件的电流, $u(t)$ 是该元件的端电压, 在电流、电压的关联参考方向下, 电功率 $p(t)$ 定义为

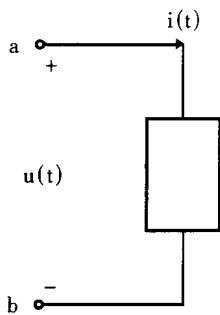
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1.3.1)$$

单位为瓦(W)或千瓦(kW)。

当 $p(t) > 0$ 时, 表示该元件吸收功率; $p(t) < 0$ 时, 表示该元件释放功率。

单个元件中的能量记为 $w(t)$, 则有

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt \quad (1.3.2)$$



能量的单位为焦耳(J)。

当 $w(t) > 0$ 时, 表示该元件从外部吸取能量; 而当 $w(t) < 0$ 时, 表示该元件向外释放能量。

电力工程中, 还常用千瓦时(度)作为电能的计量单位, 其与焦耳之间的换算关系为

$$1 \text{ 千瓦时(kW} \cdot \text{h)} = 3.6 \times 10^6 \text{ 焦耳}$$

实际上, 上述功率和能量的计算, 不仅适用于单个电路元件, 也同样适用于任何电路。

图 1.3.1 电路的电功率

各种电气元件或设备工作时, 它们的功率、电流和电压都有一定的限额, 这些限额称为该元件或设备的额定值。按照额定值的规定来使用元件或设备才能保证达到安全经济、具有一定使用寿命的目的。额定值通常由制造该产品的工厂给定, 本书用下标 N 来表示。例如一个白炽灯泡, 它的额定功率 P_N 为 40W, 额定电压 U_N 为 220V, 则表明该灯泡应工作于 220V 的电源电压之下, 此时它所消耗的功率为 40W, 工作安全而正常且有一定的使用寿命。元件或设备工作于额定值, 称为额定工作状态。

1.4 电路元件

我们所研究的电路, 一般其尺寸远远小于电路工作的波长, 电路中各元件的相对位置对电路的性能没有影响, 因而电路中各处的电压和电流只是时间的函数。如此, 电路中所发生的各类电磁现象就可以用具有集中参数特性的元件来描述。不符合这种假设条件的电路, 称为分布参数电路。本书只限于研究集中参数电路。典型的集中参数元件有电阻、电感、电容以及独立电源、非独立电源等。现分别介绍如下。

1.4.1 无源元件

1. 电阻元件

电阻元件在任一瞬时, 其两端的电压和通过的电流之间的关系, 由 $u-i$ 平面上的一条曲线所确定。如果此曲线是一条通过原点的直线, 则由它所表示的是线性电阻, 否则为非线性电阻。

本书主要讨论线性电阻元件。但是由于非线性电阻的应用日趋广泛,故对它也将作些简单介绍。图 1.4.1(a)(b)分别示出了电阻符号,线性电阻的 u - i 曲线。

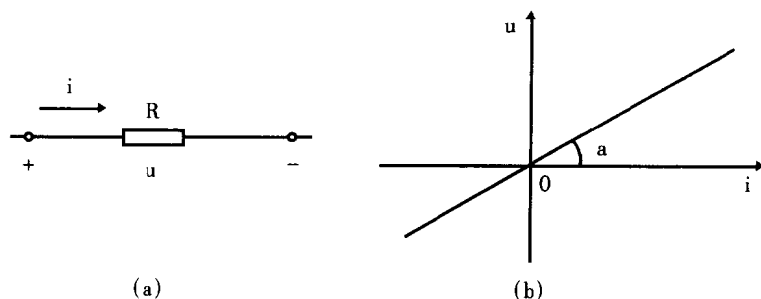


图 1.4.1 线性电阻及其 u - i 曲线

欧姆定律是描述线性电阻元件电压和电流之间关系的约束方程。对图 1.4.1(a)来说,有

$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (1.4.1)$$

其中 R 是电阻元件参数,单位为欧姆(Ω)。如果令 $G = \frac{1}{R}$,则欧姆定律的约束方程还可有另一种形式

$$i(t) = G \cdot u(t) \quad (1.4.2)$$

G 称为电导,单位是西门子(S)。

这里要特别注意,在列写元件约束方程时,电压、电流参考方向的标记非常重要。式(1.4.1)和式(1.4.2)都是在参考方向一致下的表示形式。如果电压和电流的参考方向不一致,则式(1.4.1)或式(1.4.2)都应出现一个负号。

由式(1.4.1)还可以看出,若电流一定, R 越小,电压 u 也就越小。如果 $R = 0$,则电阻元件两端之间的电压也为零。这种情况称为“短路”,即是使电路两点间的电压为零。

另一方面,若电压 u 一定, R 越大,则电流 i 越小。如果 $R = \infty$,电流即为零。这种情况称为“开路”。“开路”即是使电路两点间的电流为零。电阻元件的功率可以通过式(1.3.1)进行计算。结合欧姆定律还有如下两种常用的计算方法

$$p = ui = Ri^2 \quad (1.4.3)$$

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1.4.4)$$

由上面两式可知,电阻元件的功率 P 在任何时刻都为正,这表明电阻元件在任何时刻都是吸收功率的。因此,电阻元件是一种耗能元件。

图 1.4.2(a)(b)分别为非线性电阻的符号以及某个非线性电阻的 u - i 曲线。非线性电阻一般不再适用欧姆定律。含有非线性电阻元件的电路属于非线性电路。非线性电路分析方法很多,并且与线性电路的分析方法都有很大的不同。这里仅以两种常用的方法为例给予简要的介绍。

(1) 微变等效电路法

这是电子学中分析放大器电路的一个重要方法。它的操作思路是:虽然实际的非线性元件的特性曲线一般是一条不过原点的曲线,但是实际非线性元件对小信号而言其效应与线性元件相同,这就有可能用一个由线性元件构成的模型来等效地替换输入为小信号时的

实际非线性元件,使电路的分析大大简化。有关此法的详细内容可参看邱关源主编《电路》第三版 § 6-4 小信号分析法。

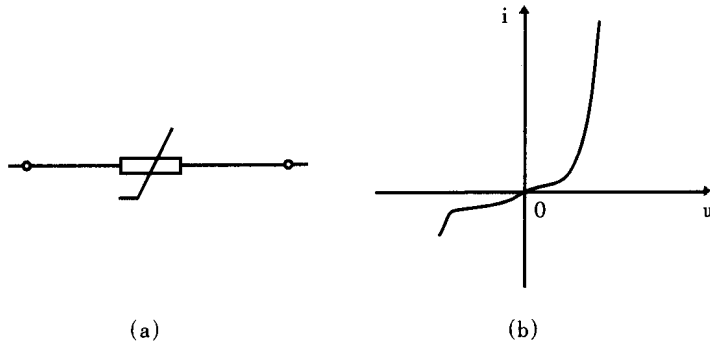


图 1.4.2 非线性电阻

(2)图解法

本法也是电子学中常常用到的一个重要方法。它直接借助于非线性的 $u-i$ 特性曲线,采用作图的方法进行求解。如图 1.4.3 所示,其中二极管 D 是非线性元件,因此图(a)所示的是一个非线性电路,图(b)中的曲线 OQP 是二极管 D 的 $u-i$ 特性曲线。用图解法求解该电路时,可将图(a)所示电路在 A 、 K 处分为两部分。右边部分是一个二极管,其中的电流和电压由图(b)中曲线 OQP 确定,左边部分则是一简单的线性电路,其中电流电压由特性方程 $i_D = \frac{E}{R} - \frac{U_D}{R}$ 确定,它是一条直线,即图(b)中的直线 QE 。该直线与二极管 $u-i$ 特性曲线的交点 Q 所对应的 U_D 和 I_D 即电路的解。图解法比较直观,具有一般性,缺点是准确度较差。

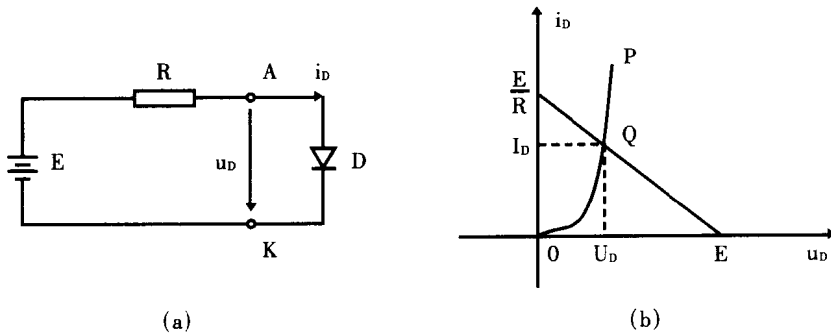


图 1.4.3 图解法之例

2. 电容元件

实际电容器一般都是由两块金属极板充以某种介质所组成,常用的介质有绝缘纸、云母片及电解质等。当在两块金属极板上加上一定的电压时,在金属极板上会各自聚集起等量异性的电荷,由此建立起介质中的电场。即便将所加电压撤去,电荷仍能保留在各自的极板上,从而使得电场继续存在。因此,实际电容器是一种可以储存电场能量的元件。我们引入电容元件来作为实际电容器的理想模型。电容元件在任一瞬时,其上的电荷量 $q(t)$ 和电压 $u(t)$ 之间的关系,由 $u-q$ 平面上一条曲线所确定。如果此曲线是一条通过原点的直线,则为线性电容,否则为非线性电容。线性电容元件的符号如图 1.4.4(a) 中所示。由图(b)可以看出成立如下关系式