

电工 技术

上册

王宏甫 张振玲 编

北京理工大学出版社

电 工 技 术

(上册)

王宏甫 张振玲 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是根据高等工科学校电工学课程教学领导小组审定的《电工技术》课程教学基本要求编写的,全书分上、下册。上册内容有电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、非正弦交流电路和电路中的过渡过程。下册内容有电机、电器、控制、电工测量和电气安全。

本书内容丰富、叙述详尽、概念清楚、通俗易懂、便于自学。在内容上除满足课程教学的基本要求外,还适当加深和拓宽了一些知识,因此适用的专业面广。

本书可作为高等工科院校非电类专业本科生学习《电工技术》课程的教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术 上册/王宏甫,张振玲编. -北京:北京理工大学出版社, 1996. 1

ISBN 7-81045-077-8

I. 电… II. ①王… ②张… III. 电工技术 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 19786 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 8.75 印张 223 千字

1996 年 1 月第一版 1996 年 1 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 12.50 元

※图书印装有误, 可随时与我社退换※

前 言

“电工学”是为高等工业学校理工科非电类专业开设的一门技术基础课。这门课内容涵盖面广，内容多、学时少的矛盾比较突出。编写一套既适合我国国情、适应科学技术发展，又能满足教学基本要求的“电工学”教材是我们长久以来的愿望。为此，我们组织部分教师，根据多年教学实践的体会，认真学习，吸收了兄弟院校的宝贵经验，编写出了这套教材。

这套教材是根据国家教委电工学课程指导小组审定的“电工学”课程教学基本要求编写的。在编写过程中注意贯彻了如下的指导思想。

第一、精选内容，确保教学基本内容。“电工学”是高等工科大学非电类专业教学计划中唯一的一门电类技术基础课，其主要内容包括电路基础、电机与控制、电子技术和电工测量、电气安全。课程的任务是使学生获得电工和电子技术方面的基本理论、基本知识和基本技能，为学习有关的后续课程和从事工程技术工作在“电”的方面打下初步基础。所以本教材注意贯彻“少而精”的原则，重视对基本内容、基本概念、基本原理和基本方法的阐述。这也是本课程的重点内容，请读者在学习中有注意掌握好。

第二、增加必要的新知识、新技术，力求内容丰富。电工、电子技术飞速发展、日新月异。为了适应这种形势，本教材删除或削弱了部分相对陈旧的内容，适当增加了一些新内容。如电路基础部分中的受控源，双口网络；电机与控制部分中的可编程序控制器；电子技术中的中、大规模集成电路的应用等。我们希望通过这些内容的学习，能够进一步开阅读者的视野、了解电工、电子技术的发展。

第三、注重实践。对于从事工程技术的人员来说，学习的目的不仅仅是为了认识世界，更重要的是要用所学到的知识去改造世界。为此本教材注意理论联系实际。在概念的阐述上尽量避免繁琐的理论推导，注意概念的说明及工程计算。如在电机、电器部分注重使用方法及实用技术，在电子技术中注意器件的外部功能、特性及实用电路的介绍等等。

还应说明的是，本教材中有一部分是加深加宽的内容，教师可根据教学要求及学时选讲。

本教材分为《电工技术》（上、下册）和《电子技术》。《电工技术》上册由王宏甫（第三、四、五章）和张振玲（第一、二、六章）编写；下册由谢铭（第七、八、九、十、十一章）和谢冠虹（第十二、十三、十四章）编写。《电子技术》由庄效桓（第一、二章）、李燕民（第三、四章）、梁淼（第五、六、七章）、刘蕴陶（第八、九章）编写。《电工技术》（上、下册）由北京理工大学黄孝和教授审稿、《电子技术》由北京理工大学成人教育学院钟治汉副教授审稿。他们认真审查了全部书稿，提出了许多宝贵的意见，并写出了评审意见。对此，我们表示衷心的感谢！

热忱欢迎广大读者、老师和同学对教材的缺点、错误和不足之处提出批评意见。谢谢！

北京理工大学电工教研室

1995. 7

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
1.1 电路的基本概念	(1)
1.1.1 电路的作用与组成	(1)
1.1.2 电路模型	(2)
1.1.3 正方向	(3)
1.2 电路元件	(5)
1.2.1 电阻元件	(5)
1.2.2 电感元件	(8)
1.2.3 电容元件	(11)
1.2.4 电源元件	(15)
1.3 克希荷夫定律	(18)
1.3.1 克希荷夫电流定律 (KCL)	(19)
1.3.2 克希荷夫电压定律 (KVL)	(21)
1.4 电路的状态和电气设备的额定值	(23)
1.4.1 有载工作状态和电气设备的额定值	(24)
1.4.2 开路状态与短路状态	(25)
1.5 电路中电位的概念及计算	(26)
习题	(29)
第二章 电路的分析方法	(36)
2.1 支路电流法	(36)
2.2 节点电位法	(39)
2.3 叠加原理	(45)
2.4 无源二端网络的等效变换	(49)
2.4.1 电阻串联、并联电路的等效变换及计算	(50)
2.4.2 电阻混联电路的等效变换及计算	(52)
2.4.3 无源二端网络等效电阻的一般求法	(55)

2.5	电阻星形联接与三角形联接的等效变换	(57)
2.5.1	电阻三角形联接等效变换为星形联接	(58)
2.5.2	电阻星形联接等效变换为三角形联接	(59)
2.6	电压源与电流源的等效变换	(62)
2.7	等效电源定理	(66)
2.7.1	戴维南定理	(67)
2.7.2	诺顿定理	(73)
2.8	含受控源电路的分析	(75)
2.8.1	受控源的类型和符号	(75)
2.8.2	含受控源电路的分析	(78)
2.9	非线性电阻电路的分析	(81)
	习题	(84)
第三章	正弦交流电路	(92)
3.1	正弦交流电的基本概念	(93)
3.1.1	交流电的正方向	(93)
3.1.2	正弦量的特征量	(94)
3.1.3	相位差	(98)
3.1.4	有效值	(101)
3.2	正弦量的相量表示法	(104)
3.3	单一参数的交流电路	(111)
3.3.1	电阻元件的交流电路	(112)
3.3.2	电感元件的交流电路	(115)
3.3.3	电容元件的交流电路	(118)
3.3.4	相量模型	(123)
3.4	简单交流电路的分析	(125)
3.4.1	克希荷夫定律的相量形式	(125)
3.4.2	串联交流电路和复阻抗	(126)
3.4.3	并联交流电路和复导纳	(132)
3.4.4	复阻抗与复导纳的等效变换	(134)
3.4.5	串并联交流电路	(138)
3.5	复杂交流电路的计算	(142)
3.6	交流电路的功率	(148)

3.6.1	瞬时功率	(148)
3.6.2	有功功率、无功功率和视在功率	(149)
3.6.3	功率因数的提高	(153)
3.7	电路中的谐振	(157)
3.7.1	串联谐振	(158)
3.7.2	并联谐振	(166)
3.8	双口网络	(170)
3.8.1	双口网络及其端口条件	(171)
3.8.2	双口网络参数方程及其等效电路	(172)
	习题	(180)
第四章	三相交流电路	(190)
4.1	三相电源	(190)
4.1.1	三相交流电动势的产生	(190)
4.1.2	三相电源的联接	(192)
4.2	三相负载的联接	(195)
4.2.1	三相负载的星形联接	(196)
4.2.2	三相负载的三角形联接	(201)
4.3	三相电路的功率	(204)
4.3.1	一般三相电路的功率	(204)
4.3.2	对称三相电路的功率	(204)
	习题	(207)
第五章	周期性非正弦交流电路	(210)
5.1	周期性非正弦量的分解	(211)
5.2	周期性非正弦量的有效值和平均值	(215)
5.2.1	有效值	(215)
5.2.2	平均值	(216)
5.3	非正弦交流电路的功率	(218)
5.4	非正弦交流电路的计算	(220)
5.5	滤波器的概念	(222)
5.5.1	低通滤波器	(223)
5.5.2	高通滤波器	(223)
5.5.3	谐振滤波器	(223)

习题	(226)
第六章 电路中的过渡过程	(228)
6.1 换路定律与过渡过程初始值和稳态值的确定	(229)
6.1.1 电路产生过渡过程的原因	(229)
6.1.2 换路定律	(230)
6.1.3 过渡过程初始值的确定	(231)
6.1.4 过渡过程稳态值的确定	(234)
6.2 RC 电路的过渡过程	(235)
6.2.1 RC 电路的放电过程	(235)
6.2.2 RC 电路的充电过程	(238)
6.3 微分电路和积分电路	(244)
6.3.1 微分电路	(244)
6.3.2 积分电路	(247)
6.4 RL 电路的过渡过程	(249)
6.4.1 RL 电路电流衰减过程	(249)
6.4.2 RL 电路接通恒定电压	(251)
6.5 三要素法	(255)
6.6 RLC 串联电路的放电过程	(260)
6.6.1 $\delta > \omega_0$, 即 $R > 2\sqrt{L/C}$	(261)
6.6.2 $\delta < \omega_0$, 即 $R < 2\sqrt{L/C}$	(263)
6.6.3 $\delta = \omega_0$, 即 $R = 2\sqrt{L/C}$	(265)
习题	(266)
主要参考文献	(272)

第一章 电路的基本概念 和基本定律

本章在简要介绍电路的作用、组成及电路模型之后，着重讨论了电压、电流的正方向及电路元件的伏安（V-A）特性和克希荷夫定律，它们是分析电路的依据。因此，是全书的重要理论基础。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的作用与组成

什么叫电路？简单地说，电路是电流流过的全部通路，它是由一些实际部件（如电池、电阻器、电容器等）为完成某些特定功能按一定方式联接起来的。

电路的功能很多，其中主要有两个。一个是输送和转换电能。图1.1-1是一个最简单的电路。它是由两根导线把灯泡与两节电池联接在一起，形成一个闭合电流通路。在这个电路中，电池把化学能转换成电能供给灯泡；而灯泡又将电能转换成热能及光能用以照明；导线起联接和输送电能的作用。电路的另一个功能是传递

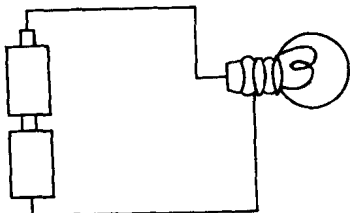


图1.1-1

和处理信息。常见的例子如收音机。广播电台把播音员的声音转换为电信号发送出去，收音机的天线把载有语音信息的电磁波接

收后,转换为相应的电信号,然后通过电路的传送和处理,送到扬声器,还原为原始的声音。

通常把其它形式能量(如机械能、化学能)转换为电能的设备叫电源,而把电能转换为其它形式能量的设备叫负载。不同功能的电路,其基本组成部分有电源、负载和联接导线。为了实现电路接通、切断和各种保护措施,电路中还需要有一些辅助设备,如开关、熔断器等。

在电路中,把推动电路工作的电源或信号源的电压电流称为激励,而把由于激励的作用在电路中所产生的电压或电流称为响应。

1.1.2 电路模型

组成电路的实际部件通常是比较复杂的,所以在分析和计算任何实际电路时,常把组成电路的实际部件抽象成由一些理想元件所组合起来的电路模型来表示。理想元件在一定条件下突出实际部件的主要电磁性质且可用数学方法精确定义。如电池的内阻和灯丝的电阻相比是很小的,若可以忽略不计,就可以把电池看作是能够提供恒定电压的理想电压源;在导线很短,其电阻与负载电阻相比可忽略不计时,则认为它是没有电阻的理想导体;当灯丝被认为只有阻碍电流通过的作用时,就可以用一个理想的电阻元件来表示。这样,一个由电池、灯泡和连接导线所组成的实际照明电路就可以用一个理想电压源、理想电阻元件和理想联接导体组成的电路模型来表示。如图1.1-2所示。

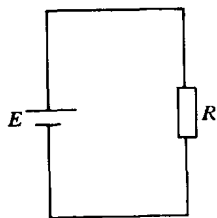


图1.1-2

由于在一定条件下,模型能表征或近似表征实际部件的主要物理性质,所以通过分析电路模型,就可知道实际电路的性能。因此,今后我们所研究的电路都是由理想元件所构成的电路模型。

1.1.3 正方向

电路中能量的传递与转换, 不仅与电流、电压、电动势的大小有关, 还与它们的方向有关。习惯上, 人们把正电荷运动的方向或者负电荷运动的反方向规定为电流的方向, 电压的方向规定为由高电位指向低电位, 而电动势的方向则规定为由低电位指向高电位, 即电位升的方向。上述电流、电压、电动势的方向又叫实际方向或真实方向。

在分析复杂的直流电路时, 人们很难预先判断电路中电流、电压和电动势的实际方向, 而在交流电路中, 它们的实际方向随时间不断变化, 因此其实际方向就更难确定了。为此, 引入了正方向这一概念。在分析电路时, 电流、电压和电动势的正方向可以任意假定, 在确定正方向后, 作如下规定: 当电流、电压、电动势的实际方向与正方向相同时, 它们取正值, 反之, 则取负值。这样就可利用电流、电压、电动势的正、负值, 结合其正方向来表示它们的实际方向。例如在图1.1-3 (a) 中, 箭头所指由 A 至 B 的方向为电路中电流的正方向, 其值为 $1A$, 则表示电流的实际方向与正方向相同, 即电流的实际方向由 A 流向 B 。在图1.1-3 (b) 中, 若假定电压的正方向由 A 指向 B , 则当 $U = -1V$ 时, 表

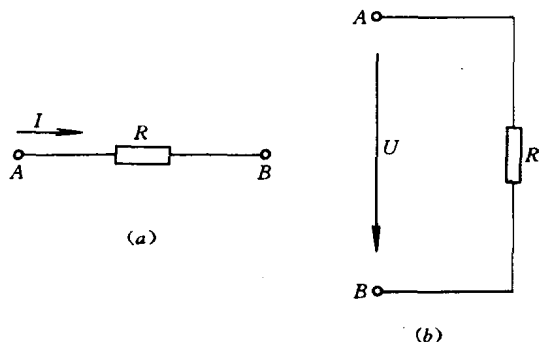


图1.1-3 电压、电流正方向

明电压的实际方向与正方向相反,即 A 点电位低于 B 点电位 $1V$ 。可见,如果离开了正方向来谈电流、电压的正、负是没有意义的。

电流、电压、电动势的正方向也叫参考方向,在电路图中均可用箭头表示,而电压、电动势的正方向也可用表示电位高低的“+”、“-”号表示,在书写时电压的正方向还可用双下标表示,如 U_{AB} 表示电压的正方向为由 A 点指向 B 点。今后在未加说明时,本书电路图上所标各物理量的方向均指其正方向。

电压和电流的参考方向原则上都可以任意假定,但为了计算简便,在分析电路时,尽可能采用“关联”参考方向,即把一段电路的电压和电流参考方向选取一致。根据这一原则,在未加说明的情况下,只要选定一段电路的电压或者电流任何一个量的参考方向后,另一个量的参考方向也就随之而定了。

当一段电路(可由一个或多个元件组成)两端的电压和电流取关联参考方向时,对其功率计算做如下规定:若 $P > 0$,则该电路是吸收功率或者是消耗功率;若 $P < 0$,则该电路是提供功率或产生功率。这一点是很容易理解的,一段电路两端的电压和电流取关联参考方向,而功率又大于零时,因为 P 是 U 、 I 的乘积,所以在此情况下,一种可能是电压、电流的实际方向与参考方向相同,即都为正值;另一种可能是电压、电流的参考方向与实际方向都相反,即都为负值。但无论哪种情况,电压和电流的实际方向都是相同的。这就说明正电荷在通过该段电路时是由高电位到低电位,即失去了电能。所以该段电路是消耗了电能,或者是将电能储藏起来,转变为其它形式的能量,我们称它为吸收了电能。而当一段电路的电压、电流取关联参考方向,而功率又小于零时,说明这段电路的电压和电流的实际方向相反。也就是说,正电荷通过这段电路时,是由低电位向高电位移动的,因此正电荷获得了电能,表明在这段电路中外力克服电场力做功,具有对外电路做功的能力,因此说这段电路是产生功率或者是提供功率。

例1.1-1 在图1.1-4中,方框 N 表示电路的一部分或一个

元件。若 N 两端的电压和电流参考方向如图 1.1-4 中所示。当 (1) $U=1\text{V}$, $I=1\text{A}$, 和 (2) $U=1\text{V}$, $I=-1\text{A}$ 时, 求 N 所消耗或产生的功率。

解 在图 1.1-4 中, 电压、电流参考方向一致, 即为关联参考方向。

由 $P=UI$ 得出

(1) 当 $U=1\text{V}$, $I=1\text{A}$ 时, N 的功率为

$$P=UI=1\times 1=1\text{W}$$

$$\because P>0 \quad \therefore N \text{ 消耗功率}$$

(2) 当 $U=1\text{V}$, $I=-1\text{A}$ 时, N 的功率为

$$P=UI=1\times (-1)=-1\text{W}$$

$$\because P<0 \quad \therefore N \text{ 产生功率}$$

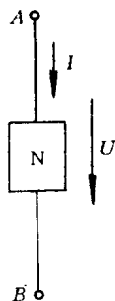


图 1.1-4

1.2 电路元件

从能量转换角度进行分析, 电路中存在将化学能、机械能等形式的能量转换为电能, 即产生电能以及电能的消耗、磁场能量的储存和电场能量的存储。恒压源和恒流源是表征将其它形式的能量转换为电能的理想电路元件。而电阻元件、电感元件、电容元件则分别表征电能的消耗、磁场能量和电场能量的存储, 这三个元件也都是理想电路元件, 简称电阻、电感和电容。

本节将讨论这些电路元件的物理性质和元件上电压与电流的关系, 以及功率和能量的转换问题。

1.2.1 电阻元件

凡是对电流通过具有阻碍作用并把电能不可逆地转换为其它形式能量的元件称为电阻元件。文字符号为 R , 其性质用电阻 R 这一参数表征。

在电阻元件两端加上电压, 则有电流通过。电阻元件两端的

电压与通过电流之间的关系可在伏安平面上用一条曲线表示，该曲线称为电阻元件的 $V-A$ 特性曲线。

若电阻元件的 $V-A$ 特性曲线通过坐标原点且为一条直线，如图1.2-1所示，则称该电阻元件为线性电阻元件。其电路符号如图1.2-2所示。

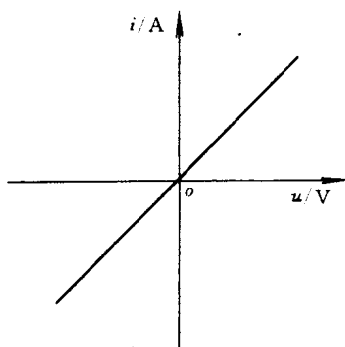


图1.2-1 线性电阻元件 $V-A$ 特性曲线

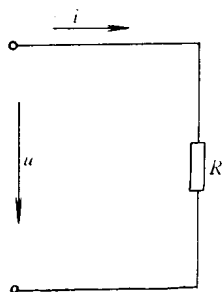


图1.2-2 电阻元件电路符号

线性电阻的特点是电阻值为一常数，与通过它的电流和作用在它两端的电压大小无关。

线性电阻元件中通过的电流与它两端的电压成正比，即遵循欧姆定律。当 u 、 i 正方向一致时，如图1.2-2所示。有

$$u = iR \quad (1.2-1)$$

式中 u ——电压 (V)； i ——电流 (A)； R ——电阻 (Ω)；阻值高的电阻用 $k\Omega$ ($=10^3\Omega$) 或 $M\Omega$ ($=10^6\Omega$) 为单位。

由上式可知，电阻元件两端的电压与通过它的电流总是同时存在的，所以说电阻元件是一个“无记忆”元件。也可以说电阻元件中的电压（或电流）只由同一时刻的电流（或电压）所决定，而与过去的历史情况无关。

若将式 (1.2-1) 两边同乘以 i ，得瞬时功率

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.2-2)$$

由于 p 与 i^2 或 u^2 成正比, 故电阻元件上的功率总是大于或等于零的。这说明电阻是消耗电能的。若时间是从 0 到 T , 则在这段时间内电阻所消耗的电能为

$$W = \int_0^T p dt = \int_0^T u i dt = \int_0^T R i^2 dt = \int_0^T \frac{u^2}{R} dt \quad (1.2-3)$$

这些电能全部变成热能散失于周围空间。因此, 电阻消耗电能的过程是不可逆的能量转换过程。

V - A 特性曲线不是直线的电阻元件称为非线性电阻元件, 如图 1.2-3 所示的二极管的 V - A 特性曲线。非线性电阻元件的电路符号如图 1.2-4 所示。

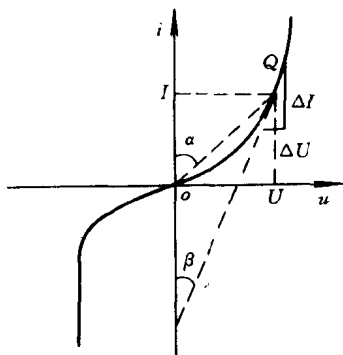


图 1.2-3 非线性电阻元件 V - A 特性曲线

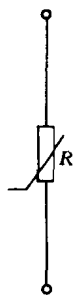


图 1.2-4 非线性电阻元件电路符号

非线性电阻元件的电压与电流之间的关系不遵循欧姆定律, 其电阻值不是常数, 它随着电阻两端的电压或电流值不同而变动。因此, 要确定非线性电阻元件的电阻值, 必须知道该电阻元件的 V - A 特性曲线以及工作时的电压或电流值, 由于这个值确定了电阻元件的工作状态, 故称为工作点, 如图 1.2-3 的 Q 点。

工作点 Q 处的电压 U 与电流 I 之比称为非线性电阻元件 Q

点的静态电阻（或称为直流电阻）。

即

$$R = \left. \frac{U}{I} \right|_Q \quad (1.2-4)$$

由图1.2-3可见，Q点的静态电阻正比于 $\operatorname{tg}\alpha$ 。

工作点Q附近的电压微变量 ΔU 与电流微变量 ΔI 之比的极限称为非线性电阻元件的动态电阻（或称为交流电阻），用英文小写字母 r 表示。

$$r = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_Q = \left. \frac{dU}{dI} \right|_Q \quad (1.2-5)$$

由图1.2-3可见，Q点的动态电阻正比于 $\operatorname{tg}\beta$ ， β 是Q点的切线与纵轴的夹角。

实际用到的白炽灯、电阻炉以及电位器、金属膜电阻等，尽管它们的用途、结构各不相同，但在电路中表现出主要的电特性确是相同的，即都具有阻碍电流通过的作用且消耗电能。因此，它们均可用电阻元件作为电路模型。

本书中凡未加说明的电阻元件均指线性电阻元件。

1.2.2 电感元件

凡是有电流通过的场合，其周围必然产生磁场。当电流通过线圈时将产生比较集中的磁场，电感元件是电路储存磁场能量的元件。

电感元件简称电感，它存储磁场能量的特性用电感 L 这一参数表示。电感元件的电路符号如图1.2-5(a)所示。

图1.2-5(b)中，在线圈的两端加电压 u ，线圈中将有电流 i 通过。若设 u 、 i 为关联参考方向，线圈的匝数为 N ，电流通过每匝线圈产生的磁通为 ϕ ，则乘积

$$\psi = N\phi$$

称为线圈的磁链。若磁通的正方向与电流的正方向符合右手螺旋