

高等学校教材

电 路

(第三版)

上册

邱 关 源 主 编

高等教育出版社



高等学校教材

电 路

(第三版)

上 册

邱关源 主编

YU27/

高等教育出版社

内 容 简 介

本书的第一版和第二版为《电路(电工原理 I)》和《电路(修订本)》，此为第三版。本书的内容满足工科电工课程教学指导委员会于 1986 年制订的高等工业学校电路课程(130—160 学时)的教学基本要求，并经高等学校工科电工课程教学指导委员会电路理论及信号分析小组审查通过，作为电工类教材出版。

全书共有 20 章和两个附录，分上、下两册出版。上册有 14 章：电路模型和电路定律，电阻电路的等效变换，电阻电路的一般分析，电路定理，具有运算放大器的电阻电路，非线性电阻电路，一阶电路，二阶电路，一阶和二阶非线性电路，相量法，正弦电流电路的分析，具有耦合电感的电路，三相电路，非正弦周期电流电路和信号的频谱。下册包括 6 章和附录：拉普拉斯变换，网络函数，电路方程的矩阵形式，二端口网络，电路设计，开关电容网络简介，均匀传输线(附录 A)，磁路和铁心线圈(附录 B)。每章及附录均有习题，书末附有答案。



邱关源 主编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装

· 开本 850×1168 1/32 印张 14.25 字数 350 000

1978 年第 1 版 1989 年 4 月第 3 版 1989 年 8 月第 2 次印刷

印数 5 145—33 155

ISBN7-04-002131-5/TM·130

定价 3.45 元

第三版序言

本书的第一版《电路(电工原理 I)》和第二版《电路(修订本)》先后于 1978 年和 1982 年出版。此次出版的为第三版。新版本内容满足工科电工课程教学指导委员会于 1986 年制订的高等工业学校电路课程(130—160 学时)的教学基本要求。全书共有 20 章和两个附录,分上、下两册出版。

与第二版对比,主要的变动和调整有:(1)把图论的基本知识前移;补充了建立电路方程的 $2b$ 法。(2)把运算放大器前移,作为一种基本多端元件来处理,有关内容也随之而加强。(3)非线性电路的部分内容经过改写并稍有充实。这部分移到了上册,目的是为了有利于配合后续课程的需要,不过仍可放在线性电路部分的后面来讲授。(4)增加了电路设计的初步概念。除在个别章节中略有涉及外,专门增加了一章(第十九章),这可能有利于加强工程背景。(5)增加了有关开关电容网络的初步知识(第二十章)。这新增加的两章均作为参考内容列入。(6)个别图形符号和正弦电流电路部分的少量定义参照有关国家标准作了相应的变动。(7)删去了网络的计算机辅助分析的内容。

本版本对基本内容、传统内容和新内容的协调予以充分的注意,而以前两者为主。由于电路课程的教学时数不可能增多,除考虑到各部分内容的分量恰当外,删简了一些较繁琐的或过分强调技巧的内容,而力图突出基本概念和基本原理,并采用比较有效和精炼的方式把问题交待清楚。这样做可能更有利于培养学生在教师指导下的自学能力。

考虑到一些专业的教学需要,书末增加了有关磁路的内容作为附录。本版本保留了第二版的部分例题和习题,而总的习题数

量则有所增加,并增加了少量需要用计算机求解的练习。

书中标有星(*)号并排成小字的章节均属参考内容,可以根据实际需要和可能有所取舍,不一定都要讲授。

参加本版修订工作的有邱关源、刘正兴、叶金官。本书承哈尔滨工业大学周长源、刘润、高象贤同志仔细审阅并提出宝贵修改意见,谨致以衷心谢意。书稿经高等工业学校电路理论与信号分析课程教学指导小组同意作为教材出版。

本书在某些方面所作的变动和尝试,以及书中的不足和错误之处,均希读者予以批评指出。意见请寄西安交通大学电工原理教研室。

编 者

1988 年

第二版序言

本书系《电路(电工原理 I)》的修订本。修订本的内容及其次序的安排,基本上符合电工教材编审委员会于 1980 年 6 月审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)各专业试用的《电路教学大纲(草案)》。全书共有十四章和一个附录,分上、下两册出版。

与原版本对比,修订本加强和充实了基本的和传统的内容,并调整了原版本后半部分的一些内容。变动较大的地方有:(1) 电路元件的介绍集中在第一章。(2) 受控源的概念提到前面,因此各种分析和计算方法中均包括具有受控源的电路。(3) 过渡过程(时域分析)放在第三章,在正弦电流电路稳态分析的前面。但是,只要稍作一些补充,把第三章移到后面(即仍按原版本的次序)讲授也是可行的。有关部分的写法考虑了这种可能性。(4) 原版本的第三章(正弦电流电路的基本概念)不再单独作为一章,其中部分内容删去,部分内容放在本书的第一章,而其主要内容则结合在本书的第四章中。(5) 原版本的第十五章(状态方程)删去,部分内容分别放在本书的第十章和第十三章。(6) 原版本的第十三章(矩阵),十六章(计算方法),十八章(磁路和铁心线圈)均删去;计算方法的某些内容则移在本书的第十四章。(7) 非线性电路的大部分内容经过重写。(8) 增加了有关均匀传输线的内容,放在附录中。实质上这部分是本书的一章,主要供不设《电磁场》课程的专业选用,也供愿意在《电路》课程中讲授具有分布参数的电路的教师选用。(9) 增加了有关计算机辅助分析内容的一章,但全章作为参考内容处理。

本书保留了原版本的部分内容和例题。习题则全部重选,数

量上略有减少，但类型则稍有增加。使用本书的教师可以适当地自选一些习题作为补充。

书中排成小字的内容，包括标有星号(*)的整节，以及排成大字的第十四章都属加深加宽的内容，供参考用。在使用本书教学时，这些内容均可根据实际需要和可能而有所取舍。

参加本书修订工作的有：邱关源、范丽娟、刘国柱、江慰德和刘正兴。本书初稿承哈尔滨工业大学周长源、高象贤和刘润同志仔细审阅，并提出宝贵的修改意见，谨致以衷心的感谢。书稿并经高等学校电工教材编审委员会电路理论及信号分析编审小组审查通过。

本书虽然在原版本的基础上，根据各方面的读者提出的建设性意见作了一些改进，但缺点和错误之处在所难免，希望读者予以批评指出。意见请寄西安交通大学电工原理教研室。

编者

1982年

目 录

第一章 电路模型和电路定律	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电流和电压的参考方向	4
§ 1-3 功率	7
§ 1-4 电阻元件	9
§ 1-5 电容元件	13
§ 1-6 电感元件	17
§ 1-7 电压源和电流源	21
§ 1-8 受控源	26
§ 1-9 基尔霍夫定律	28
习 题	34
第二章 电阻电路的等效变换	40
§ 2-1 引言	40
§ 2-2 电阻的串联、并联和串并联	40
§ 2-3 电阻的 Y 形联接与 Δ 形联接的等效变换	45
§ 2-4 电压源、电流源的串联和并联	50
§ 2-5 电源的等效变换	52
§ 2-6 输入电阻和等效电阻	55
习 题	58
第三章 电阻电路的一般分析	63
§ 3-1 电路的图	63
§ 3-2 KCL 和 KVL 的独立方程数	66
§ 3-3 支路法	72
§ 3-4 节点法	75
§ 3-5 网孔法和回路法	83
习 题	95

第四章	电路定理	101
§ 4-1	叠加定理	101
§ 4-2	替代定理	108
§ 4-3	戴维南定理和诺顿定理	109
§ 4-4	特勒根定理	109
§ 4-5	互易定理	123
§ 4-6	对偶原理	126
	习 题	128
第五章	具有运算放大器的电阻电路	135
§ 5-1	运算放大器的电路模型	135
§ 5-2	比例电路的分析	139
§ 5-3	具有理想运算放大器的电路的分析	142
	习 题	147
第六章	非线性电阻电路	150
§ 6-1	非线性电阻元件	150
§ 6-2	非线性电阻的串联和并联	155
§ 6-3	分段线性化方法	159
§ 6-4	小信号分析法	163
*§ 6-5	具有工作在非线性范围的运算放大器的电路	167
§ 6-6	非线性电阻电路方程	173
*§ 6-7	牛顿-拉夫逊法	175
	习 题	180
第七章	一阶电路	184
§ 7-1	动态电路及其方程	184
§ 7-2	电路的初始条件	185
§ 7-3	一阶电路的零输入响应	188
§ 7-4	一阶电路的零状态响应	195
§ 7-5	一阶电路的全响应	204
§ 7-6	一阶电路的阶跃响应	208
§ 7-7	一阶电路的冲激响应	211

§ 7-8	卷积积分	220
	习 题	224
第八章	二阶电路	233
§ 8-1	二阶电路的零输入响应	233
§ 8-2	二阶电路的零状态响应和阶跃响应	246
§ 8-3	二阶电路的冲激响应	249
§ 8-4	结束语	251
	习 题	252
第九章	一阶和二阶非线性电路	255
§ 9-1	非线性电容元件和电感元件	255
§ 9-2	一阶非线性电路	258
§ 9-3	二阶非线性电路方程	266
*§ 9-4	状态平面	269
*§ 9-5	非线性振荡电路	276
	习 题	279
第十章	相量法	281
§ 10-1	正弦量	281
§ 10-2	相量法的基本概念	287
§ 10-3	电路定律的相量形式	295
	习 题	300
第十一章	正弦电流电路的分析	304
§ 11-1	阻抗和导纳	304
§ 11-2	阻抗(导纳)的串联和并联,相量图	312
§ 11-3	正弦电流电路的功率	318
§ 11-4	复功率	324
§ 11-5	正弦电流电路的稳态分析	326
§ 11-6	正弦电流电路的串联谐振	331
§ 11-7	正弦电流电路的并联谐振	340
§ 11-8	最大功率传输	344
	习 题	346

第十二章 具有耦合电感的电路	359
§ 12-1 互感	359
§ 12-2 具有耦合电感的电路的计算	364
§ 12-3 空心变压器	371
§ 12-4 理想变压器	373
习 题	376
第十三章 三相电路	380
§ 13-1 三相电路	380
§ 13-2 对称三相电路的计算	385
§ 13-3 不对称三相电路的概念	390
§ 13-4 三相电路的功率	393
习 题	396
第十四章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	401
§ 14-1 非正弦周期电流	401
§ 14-2 周期函数分解为傅里叶级数	403
§ 14-3 傅里叶级数的指数形式	410
§ 14-4 有效值、平均值和平均功率	415
§ 14-5 非正弦周期电流电路的计算	418
*§ 14-6 对称三相电路中的高次谐波	423
*§ 14-7 傅里叶积分简介	426
习 题	429

第一章 电路模型和电路定律

内 容 提 要

本章介绍电路模型和理想电路元件,其中包括电阻、电容、电感、独立电源和受控电源。引进了电流、电压的参考方向的概念。

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律,它包括电流定律和电压定律。基尔霍夫定律与构成电路的元件性质无关。

§ 1-1 电路和电路模型

实际电路是由电气器件相互联接而构成的。这里所谓的电气器件泛指实际的电路部件,如电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器等等。在电路中,随着电流的通过,进行着从其他形式的能量转换成电能、电能的传输和分配、以及把电能转换成所需要的其他形式能量的过程。典型的例子是电力系统,发电厂的发电机组把热能或原子能或水能等转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用电单位,那里又把电能转换成机械能、光能、热能等。这样构成了一个极为复杂的电路或系统。我们把供给电能的设备称为电源,而把用电设备称为负载。

电路的另一重要作用是信号的处理。通过电路把施加的信号(称为激励)变换或“加工”成为其他所需要的输出(称为响应)。收音机或电视机的调谐电路是用来选择所需要的信号的,而由于收到的信号是很微弱的,所以需要专为放大信号用的放大电路。调

谐电路和放大电路的作用就是处理激励信号使之成为所需要的响应。

在其他许多场合,如自动控制设备、计算机、通讯设备等方面有种类繁多、为完成不同任务的各种电路。

实际电路的几何尺寸相差甚大。电力系统或通讯系统可能跨越省界、国界甚至是洲际的,但集成电路的芯片则不大于指甲,而在这样大小的芯片上却可能有成千上万甚至数十万个晶体管相互联接成为一个复杂的电路或系统。

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象,而用电流、电荷、电压或磁通等物理量来描述其中的过程。电路理论的目标是计算电路中各器件的端电流和端子间的电压,而一般不涉及器件内部发生的物理过程。电路理论中有一个重要的假设,当构成电路的器件以及电路本身的尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长,或者说电磁波通过电路的时间可认为是瞬时的,则电磁场理论和实践均证明在任意时刻流入各器件任一端子的电流和任两个端子间的电压都将是单值的量。在这种近似条件下,我们用足以反映其电磁性质的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。这种理想电路元件称为集总元件或集总参数元件。理想电路元件是具有某种确定的电磁性质的假想元件。它是一种理想化的模型并具有精确的数学定义。电路理论中我们用抽象的理想元件及其组合近似地代替实际的器件,从而构成了与实际电路相对应的电路模型。实际电路中各器件的端子是通过导线相互联接起来的,而在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”联接起来的。

理想电路元件是通过端子与外部相联接的,而根据端子的数目可分为二端、三端、四端元件等等。我们认为在任何时刻,从具有两个端子的集总元件的一个端子流入的电流将恒等于从另一端子流出的电流,并且元件的端电压是单值的。对于多于两个端子

的集总元件来说,在 任何时刻流入任一端子的电流和任意两端之间的电压是单值的量。由集总元件构成的电路称为集总电路,或具有集总参数的电路。从电磁场理论的观点,集总电路的尺寸可以完全忽略不计。如果实际电路的尺寸不远小于工作时电磁波的波长,则这种电路便不能按集总电路来处理。本书正文只考虑集总电路,分布电路(或称为具有分布参数的电路)在附录中介绍。

本章后面将分别介绍各种(理想)电路元件(今后涉及的一般均为理想元件,故往往略去“理想”二字),如二端电阻元件、电容元件、电感元件等等。

图 1-1 a 所示的一个简单的实际电路,其中有一个电源(干电池),一个负载(小灯泡)和两根联接导线,其电路模型将如图 1-1 b 所示,电阻元件 R 表示小灯泡,干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 来表示,而联接导线在电路模型中用相应的理想导线(即认为它们的电阻为零)或线段来表示。

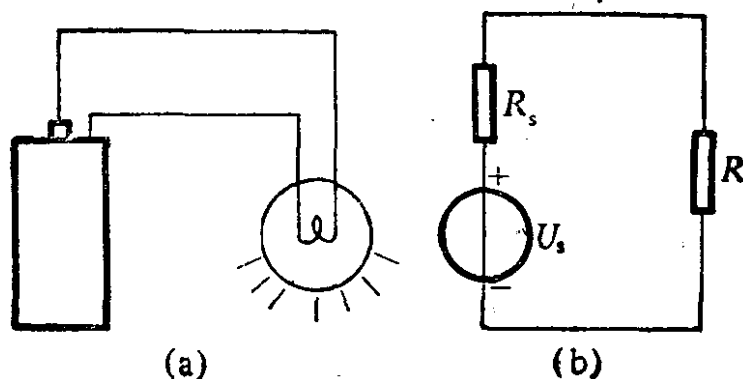


图 1-1 电路模型

应当注意电路元件与实际器件的区别。例如实验室或电子仪器中用的各式各样的电阻器、电容器、线圈、晶体管等等,一般都可以用电路元件及它们的组合来模拟,但两者之间不完全等同。通常在一定的工作条件下,根据实际器件的主要物理功能,可按不同的精确程度用电路元件及它们的组合来予以模拟。例如,在工作频率比较低时,一个线圈就可以用电阻和电感元件的串联组合构

成的模型来描述。当频率较高时，线圈的绕线之间的电容效应就不容忽视，这种情况下表征这个线圈的较精确的模型还应当包含电容元件。总之在不同条件下，同一实际器件可能要用不同的电路模型来模拟。本书将不涉及如何建立模型的问题。

今后我们所说的电路一般均指由理想电路元件构成的抽象电路而非实际电路。大量实践充分证实只要电路模型取得恰当，按抽象电路分析计算所得结果与对应的实际电路中测量所得结果基本上是一致的。当然，如果电路模型选择得不好，则会造成很大误差，有时甚至还可能导致自相矛盾的结果。在某种意义上可以说电路理论是一门相当精确的工程学科，这是因为按理论所预测的电路性状一般与实际情况是十分接近的。

电路理论是一门研究网络^①分析和网络综合或设计的基础工程学科，它涉及的面非常广泛。本书的主要内容是介绍电路理论的入门知识，其重点是电路的分析，它探讨电路的基本定律和定理，并讨论电路的各种计算方法。电路中的物理量主要有电流、电荷、电压和磁通。此外，能量和功率也很重要。无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过几种理想电路元件所构成的抽象电路充分地描述。分析和计算这种电路的基本定律也只有几个。研究电路分析的一个重要目标往往是为了进行电路的设计，并力图使得设计电路的性能良好，同时又要设法降低其成本，提高可靠性等。本书将涉及一点有关电路设计的初步知识。

§ 1-2 电流和电压的参考方向

电流在导线中或一个电路元件中流动的实际方向只有两种可

^① 本书中“网络”与“电路”将不加区分地被引用。近年来国外有人主张不再用“网络”(network)，而只用“电路”(circuit)，其主要理由是“网络”的含义广泛。

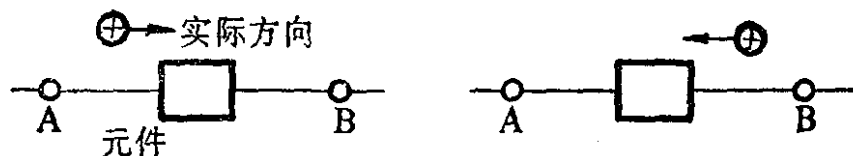


图 1-2 电流方向

能,见图 1-2。当有正电荷的净流量从 A 端流入并从 B 端流出时,习惯上就认为电流是从 A 端流向 B 端,反之,则认为电流是从 B 端流向 A 端。电路分析中,有时对某一段电路中电流实际流动方向很难预先判断出来,有时电流的实际方向还在不断地改变,因此很难在电路中标明电流的实际方向。由于这些原因,引入了电流“参考方向”的概念。

在图 1-3 中先选定其中某一个方向作为电流的方向,这个方向叫做电流的参考方向(图中用实线表示)。当然所选的方向并不一定就是电流实际的方向(图中用虚线表示)。把电流看成代数量。若电流的参考方向与它的实际方向一致,则电流为正值($i > 0$);反之,若电流的参考方向与它的实际方向相反,则电流为负值($i < 0$),见图 1-3。于是,在指定的电流参考方向下,电流值的正和负,就可以反映出电流的实际方向。

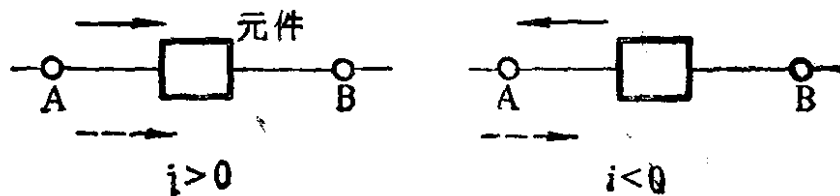


图 1-3 电流的参考方向

电流的参考方向是任意指定的,在电路中一般用箭头表示。也有用双下标表示的,如 i_{AB} ,其参考方向是由 A 指向 B。

同理,两点之间的电压的实际方向(即高电位点指向低电位点的方向)也只有两种可能,可以选定其中任意一个方向为电压的参

考方向。同时,把电压看成代数量。当电压的参考方向与它的实际方向一致时,电压为正值($u > 0$);反之,当电压的参考方向与它的实际方向相反时,电压为负值($u < 0$)。

电压的参考方向也是任意指定的。在电路中,电压的参考方向可以用正(+)、负(-)极性来表示,正极指向负极的方向就是电压的参考方向(见图 1-4)。有时为了图示方便起见,也可以用一个箭头来表示电压的参考方向(图 1-4);还可以用双下标表示,如

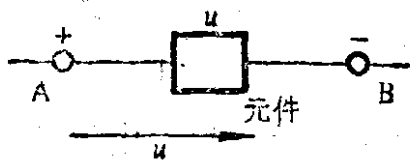


图 1-4 电压的参考方向

u_{AB} 表示 A 和 B 之间的电压的参考方向由 A 指向 B。

引入电流和电压的参考方向后,电流和电压便可用函数来表示,如图 1-5 中,电流按正弦规律随时间变化,则可表示成 $i(t) = I_m \sin \omega t$, 其中 $\omega = 2\pi/T$ 。对任何电路进行分析时都应先指定各处的电流和电压的参考方向。

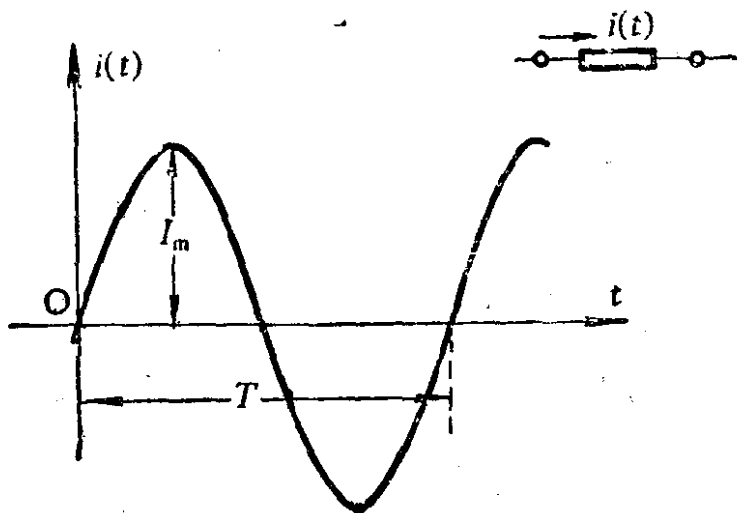


图 1-5 正弦电流