

电 路 原 理

上 册

江 绎 光 主 编

清 华 大 学 出 版 社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是为大学本科电类各专业的《电路》课程编写的教科书,它的内容包括了工科电工课程教学指导委员会制订的对高等学校电路课程教学的基本要求,并在某些内容上有所拓展。

全书共分十九章,分上下册出版。上册有十三章:电路元件和电路定律;简单电阻电路的分析方法;线性电阻电路的一般分析方法;电路的若干定理;非线性电阻电路;一阶电路;二阶和高阶电路;正弦电流电路的稳态分析;有互感的电路;电路中的谐振;电路的频率特性;三相电路;周期性激励下电路的稳态响应。下册有六章:傅里叶变换和拉普拉斯变换;二端口;网络图论基础;状态变量法;非线性电路简介;分布参数的电路。另有附录,介绍磁路和含铁心的线圈。各章均附有习题,书末附有答案。

本书可供高等学校工科电类各专业作为《电路》课程的教材,也可供从事电力、电子、自动化、计算机等方面工作的工程技术人员作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理 上册/江辑光主编. —北京:清华大学出版社,1995
ISBN 7-302-01968-1

I. 电… II. 江… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17324 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)
责任编辑:刘元元
印刷者:北京市海淀区清华园印刷厂
发行者:新华书店总店北京科技发行所
开本:850×1168 1/32 印张:16.125 字数:416 千字
版次:1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月第 1 次印刷
书号:ISBN 7-302-01968-1/TM·22
印数:0001—5000
定价:12.80 元

前 言

本书是为工科大学电类专业本科学生学习《电路原理》而编写的教科书,全书共 19 章,分上下两册出版。

本书的内容覆盖了电类专业电路课程的基本内容,并在某些方面稍有拓展。作为一门技术基础课程的教科书,本书着重于基本的传统内容,也包含近代电路理论的一些基本内容。在编写此书时,作了下面的一些考虑和相应的安排。

(1) 考虑到《电路原理》是一门技术基础课程,它的内容是许多电类专业课程的共同的基础,更考虑到现代电工技术的发展,电力技术和电子技术的相互结合日益密切,习惯上称为强电和弱电的各专业在对电路原理的基础理论的需要上并无太多的差异,所以此教材是作为电类各专业的通用教材而编写的。自然,在课程安排有所不同的情况下使用时,可以对书中的某些章节作稍有不同的取舍。

(2) 着重于基本传统内容的叙述和应用。对于基本概念、方法、定理均以相当的篇幅作了力求准确、易懂的阐述。例如:在第 4 章中用简明的方法导出了特勒根定理,以突出其与基尔霍夫定律的等价普遍性;及早地引入受控电源模型和含运算放大器的电路,以使随后关于含这类器件的电路的分析得以加强。

(3) 在电路的正弦稳态分析之后,即在第 11 章中,引入复频率和复指数形式的激励,由电路在这种激励下的强制响应导出网络函数,随即对其零、极点、频率特性、波特图等内容进行分析。这将有助于读者及早熟悉这些概念和方法。

(4) 有关非线性电路(第 5、第 18 两章)的内容主要是一些基

本概念和方法。就几个简单的电路,对非线性电路的工作点的稳定性、非线性自激振荡等重要的概念和分析方法作了简单的初步介绍,以使读者能从最简单的电路开始建立对它们的认识。

(5) 考虑到学习后续课程或自学的需要,本书将关于磁路的内容作为附录,放在书末。

(6) 本书各章均附有习题。习题的内容着重于使读者理解此课程中的基本概念,掌握电路分析的基本方法及其应用。有少数需要用计算机进行数值求解的习题可以作为计算机辅助电路计算的作业。

本书末附有绝大部分习题的答案。

本书各章的编写者分别是江缉光(第1,2,3,4,5,18,19,20章),陈允康(第6,7,10,11,16,17章),陆文娟(第8,9,14章),王树民(12,13,15章)。各章习题的选编者有赵莼善、徐福媛、李志康等。由江缉光担任全书的统稿和校定。

在编写此书的过程中肖达川教授提出了许多宝贵的意见,谨此致谢。

限于编者水平,本书在许多方面都可能存在缺点、错误,衷心欢迎批评指正。

作者 1995年10月于清华园

目 录

第 1 章 电路元件和电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流、电压、电动势	3
1.3 电路元件的功率	7
1.4 电阻元件	8
1.5 电感元件.....	10
1.6 电容元件.....	13
1.7 电源元件.....	15
1.8 受控电源.....	18
1.9 基尔霍夫定律.....	20
习题	24
 第 2 章 简单电阻电路的分析方法	31
2.1、串联电阻电路.....	31
2.2、并联电阻电路.....	33
2.3、理想电源的串联和并联.....	37
2.4、电压电源和电流电源的等效转换.....	40
2.5、星形联接与三角形联接的电阻的等效变换 (Y- Δ 变换)	45
习题	50
 第 3 章 线性电阻电路的一般分析方法	54
3.1 支路电流法.....	54

• II •

3.2	回路电流法	60
3.3	节点电压法	66
3.4	运算放大器和它的外部特性	73
3.5	含运算放大器的电路的分析	76
	习题	81
第4章	电路的若干定理	89
4.1	叠加定理	89
4.2	替代定理	95
4.3	戴维南定理和诺顿定理	97
4.4	特勒根定理	105
4.5	互易定理	109
4.6	对偶电路与对偶原理	112
	习题	119
第5章	非线性电阻电路	127
5.1	非线性电阻的伏安特性	127
5.2	非线性电阻的串联、并联电路	129
5.3	非线性电阻电路的方程	132
5.4	小信号分析方法	135
5.5	非线性电阻电路方程解答的存在性与唯一性	139
5.6	非线性电阻电路方程的数值求解方法 ——牛顿法	143
5.7	非线性代数方程组的求解方法 ——牛顿-拉夫逊法	148
5.8	复杂非线性电阻电路的求解 ——友网络模型的应用	150
	习题	152

第 6 章 一阶电路	157
6.1 动态电路概述	157
6.2 阶跃函数和冲激函数	159
6.3 电路中起始条件的确定	165
6.4 一阶电路的零输入响应	169
6.5 一阶电路的零状态响应	177
6.6 一阶电路的全响应	187
6.7 求解一阶电路的三要素法	193
6.8 脉冲序列作用下的 $R-C$ 电路	198
6.9 一阶电路的冲激响应	201
6.10 电路在任意波形的激励下的零状态响应 ——卷积积分.....	208
习题.....	214
 第 7 章 二阶和高阶电路	 222
7.1 线性二阶电路的微分方程及其标准形式	222
7.2 二阶电路的零输入响应	225
7.3 二阶电路的零状态响应	236
7.4 二阶电路的冲激响应	239
7.5 一个线性含受控源电路的分析	242
7.6 高阶电路	246
习题.....	253
 第 8 章 正弦电流电路的稳态分析	 258
8.1 正弦量的基本概念	258
8.2 周期性电流、电压的有效值.....	262
8.3 复数复习	264

8.4	正弦量的相量表示	267
8.5	正弦电流电路中的电路元件	274
8.6	电阻、电感和电容元件上电压和电流的 相量关系	280
8.7	基尔霍夫定律的相量形式和电路的相量模型	285
8.8	电阻、电感和电容串联的电路	289
8.9	电阻、电感和电容并联的电路	291
8.10	复阻抗、复导纳及其等效转换	294
8.11	阻抗串联、并联的电路	301
8.12	用相量法分析电路的正弦稳态响应	304
8.13	正弦电流电路中的功率	311
8.14	复功率	315
8.15	最大功率传输定理	323
	习题	325
第9章	有互感的电路	334
9.1	互感和互感电压	334
9.2	互感线圈的串联和并联	340
9.3	有互感的电路的计算	344
9.4	全耦合变压器和理想变压器	349
9.5	变压器的电路模型	352
	习题	354
第10章	电路中的谐振	360
10.1	串联电路的谐振	360
10.2	并联电路的谐振	368
10.3	串并联电路的谐振	370
	习题	374

第 11 章 电路的频率特性	378
11.1 复频率和相量法的拓广	378
11.2 网络函数	384
11.3 网络函数的频率响应	386
11.4 有源 RC 电路及其网络函数	396
11.5 波特图	404
习题	418
 第 12 章 三相电路	 422
12.1 三相电源	422
12.2 对称三相电路	427
12.3 不对称三相电路示例	441
12.4 三相电路的功率	445
习题	451
 第 13 章 周期性激励下电路的稳态响应	 457
13.1 周期性非正弦激励	457
13.2 周期性时间函数的谐波分析——傅里叶级数	458
13.3 周期性激励下电路的稳态响应 ——谐波分析法	465
13.4 周期电压、电流的有效值和平均值, 电路的 平均功率	470
13.5 周期性激励下的三相电路	479
习题	486
 习题答案	 492

第 1 章 电路元件和电路定律

1.1 电路和电路模型

电路是电工设备构成的整体,它为电流的流通提供途径。电路的基本功能是传输、变换、存储电能或电的信号。有时也称电路为电网络。

在电工技术中有着数不胜数的电工器件、设备和由它们组成的系统,例如由发电机、变压器、输电线、各种用电负载组成的电力系统;各种通信系统;含有许多电子计算机的信息系统。这些器件、设备的作用、功能虽有许多不同,但它们作为电路都遵循同样的电路定律,可以置于共同的理论中进行研究。

电路的工作是以其中的电压、电流、电荷、磁链等物理量来描述的。在电路理论中,引入一些抽象化的理想元件构成实际电路的模型。这些理想电路元件能够反映实际电路中的电磁现象,表征其电磁性质:电阻元件能表示消耗电能的器件;电感元件能表示各种电感线圈产生磁场、储存磁能的作用;电容元件能表示各种电容器产生电场、储存电能的作用;电源元件能表示各种诸如发电机、电池等器件将其它形式的能量转换成电能的作用。将这些元件适当地联接起来,便可构成实际电路的模型。分析和设计电路,都使用这样的模型。

例如图 1-1-1(a)的一个由蓄电池通过连接导线向一白炽灯供电的装置,是一个实际的电路,可以用图 1-1-1(b)的电路作为它的电路模型。在这模型中蓄电池由一电压为 U_s 的电源和一个与它串联的电阻 R_i 表示,白炽灯由一个电阻 R 表示。又例如一个用导

线绕制的线圈,在低频情况下可以用一个电感与一电阻串联的电路作为它的电路模型。

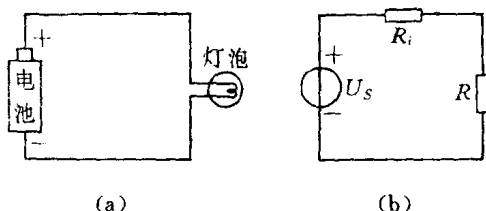


图 1-1-1 一个实际的电路和它的电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路模型

电路理论中的一些理想元件,如上面所述的电阻、电感、电容等,都分别集总地表现实际电路中的电场或磁场的作用。每一种具有两个端钮的元件中有确定的电流,端钮间有确定的电压。这样的元件称为集总参数元件,由集总参数元件构成的电路称为集总参数的电路。

对于实际的电路,由它的电路特性,构成它的电路模型,称为电路的建模。有的电路的建模较简单,例如上面所举的两个例子;有的器件或系统的建模则需要深入分析其中的物理现象才能作出它们的电路模型,例如对交流发电机、半导体晶体管,便需要分别运用有关的知识去建模,这是相应的专门课程的课题。

实际电路要能用集总参数的电路去近似,需要满足以下的条件:实际电路的线度必须远小于电路工作频率下的电磁波的波长。

电路原理课程的主要内容是分析电路中的电磁现象和过程,研究电路定律、定理和电路的分析方法,这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。

1.2 电流、电压、电动势

在这一节里简要地复习电流、电压、电动势的概念,着重说明它们的参考方向。

电流

带电质点的运动形成电流。为了表示电流的大小,引入电流强度一量。它的定义是:在时刻 t , 穿过一个面 S 的电流强度 i 等于在从 t 到 $t + \Delta t$ 的时间内,从此面的一方穿到另一方的电荷量的代数和 Δq 与此时间间隔 Δt 之比,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限,即

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

所以某一时刻 t 穿过 S 面的电流强度的值,就等于在该时刻单位时间内穿过 S 面的电荷量的代数和。通常将电流强度简称为电流。

在电路中一导线或一元件中的电流等于穿过该导线或元件任一截面的电流。为了表明电流的方向,我们必须先从两个可能的方向中选取一个方向作为参考方向,例如图 1-2-1 中的由元件的一端 A 经元件至另一端 B 的方向,并约定:沿此方向的正电荷运动所形成的电流为正值,即 $i > 0$;逆着此方向的正电荷运动所形成的电流为负值。在电路图中用顺着参考方向的箭头表示参考方向。在图 1-2-1 中,实线箭头表示参考方向,当电流的实际方向(图中虚线箭头所示)与参考方向一致时(图 1-2-1(a)),此电流为正值;当电流的实际方向与参考方向相反时(图 1-2-1(b)),此电流为负值。可见,电流的参考方向并不一定是电流的实际方向。但当有了在所选定的参考方向下的电流的表达式,我们就可以确定每一时刻电流的实际方向。电流的参考方向也称为电流的正方向。

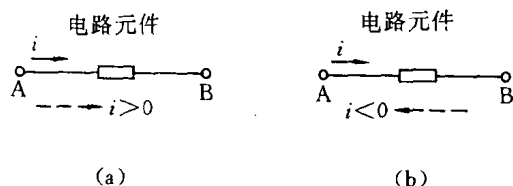


图 1-2-1 说明电流的参考方向用图

(a) i 为正时; (b) i 为负时

表示电流的参考方向还可以用双下标,例如表示图 1-2-1 中的由 A 流向 B 的电流使用 i_{AB} 。同一电流在不同的正方向选择下,所得电流的表达式符号相反,例如在图 1-2-1 中,便有

$$i_{AB} = -i_{BA}$$

在电工技术中普遍采用的国际单位制(SI)中,电荷的单位名称是库[仑],符号是 C;时间的单位名称是秒,符号是 s;电流的单位名称是安[培],符号是 A。每秒流过 1 库[仑]的电流即为 1 安。度量大的电流用千安(kA),度量小的电流用毫安(mA)或微安(μ A)等单位。

电压

在物理学的电磁学中已经知道:电荷在电场中受到电场力的作用,当将电荷由电场中的一点移至另一点时,电场对电荷做功。处在电场中的电荷具有电位(势)能。恒定电场中的每一点有一定的电位,由此引入重要的物理量电压与电位。

电场中某两点 A, B 间的电压(或称电压降) U_{AB} 等于将点电荷 q 由 A 点移至 B 点电场力所作的功 W_{AB} 与该电荷 q 的比值,即

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{W_{AB}}{q}$$

在电场中可取一点,称为参考点,记为 P,设此点的电位为零。电场中的一点 A 至 P 点的电压 U_{AP} 规定为 A 点的电位,记为 φ_A ,

即

$$\varphi_A = U_{AP}$$

在电路问题中,可以任选电路中的一点作为参考点,例如取“地”作为参考点。两点间的电压不随参考点的不同选择而改变。用电位表示 A,B 两点间的电压,就有

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

又显然有

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = -U_{AB}$$

即两点间沿两个相反方向(从 A 至 B 与从 B 至 A)所得的电压符号相反。

描述一电压必须先取定一参考方向。在电路图中用以下方式表示 A,B 两点间电压的参考方向:在 A 点标以“+”号,在 B 点标以“-”号,如图 1-2-2(a);或者用从 A 指向 B 的箭头,如图 1-2-2(b)。电压的参考方向的选取是任意的。在图 1-2-2 中,若 A 点的电位高于 B 点的电位,即 $\varphi_A > \varphi_B$,则沿此参考方向的电压为正值,即电压的实际方向与此参考方向相同;反之,若 A 点的电位低于 B 的电位,即 $\varphi_A < \varphi_B$,则沿此参考方向的电压为负值,即电压的实际方向与此参考方向相反。所以每当提到一电压时,必须先指明它的参考方向,否则就无从判断两点间电压的真实方向。

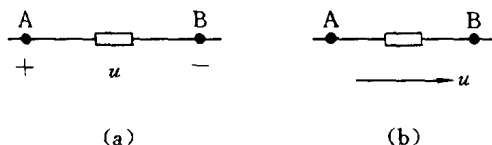


图 1-2-2 表示电压的参考方向用图

在国际单位制中能量的单位名称是焦[耳],符号是 J,电荷的单位名称是库[仑],符号是 C,电压的单位名称是伏[特],符号是 V。将 1 库(C)的电荷由一点移至另一点,电场力所作的功等于 1

焦(J),此两点间的电压便等于1伏(V)。度量电压有时用千伏(kV, 10^3V),度量小电压有时用毫伏(mV, 10^{-3}V)、微伏(μV , 10^{-6}V)等单位。

电动势

电路中一般都接有电源以维持电流的流动。从能量角度看,电源具有能将电荷从低电位处经电源内部转移到高电位处的能力,从而对电荷做功。图1-2-3是电源的示意图,图中电源的两极A,B间有“非静电力”的作用,使得电源具有移动电荷并对之作功的能力。用电动势表征电源的这种能力。设在 dt 的时间内,一电源使正电荷 dq 从负极经电源内部移至正极所作的功为 dA ,电源的电动势可用下式定义:

$$e = \frac{dA}{dq} \quad (1-2-2)$$

亦即电源的电动势的数值等于将单位正电荷从负极经电源内部移到正极电源所作的功。电动势的单位与电压相同。电动势的参考方向规定为由负极经电源内部指向正极的指向。



图 1-2-3 电源的示意图

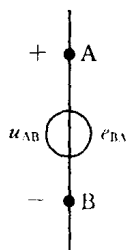


图 1-2-4 理想电压源符号

在电路图中常用图1-2-4的符号表示理想电压电源,由标有“+”号的一端(图1-2-4中的A点)到标有“-”号的一端(图1-2-4中的B点)的指向为电源电压的参考方向,这电压就等于由B点指向A点的电动势,用双下标表示就有

$$e_{BA} = U_{AB} \quad (1-2-3)$$

亦即由 B 点至 A 点的电动势等于由 A 至 B 的电压降。对于其电动势随时间变化的电源,我们总是按照取定的参考方向,写出以时间函数表示的电动势的表达式 $e(t)$,根据各时刻 $e(t)$ 的数值就可以判定各该时刻电动势的实际方向和大小。

1.3 电路元件的功率

根据电流和电压的定义,可以得到电路元件的功率的表示式。设二端元件的两端有电压 $u(t)$,元件中有电流 $i(t)$ (图 1-3-1),则此元件所吸收的功率的瞬时值 $p(t)$ 等于 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的乘积,即

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-3-1)$$

注意,在上式中 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的参考方向一致,见图 1-3-1(a)。当 $u(t)$ 与 $i(t)$ 同号时, $p(t) > 0$,就表示这时元件确实吸收功率;当 $u(t)$ 与 $i(t)$ 异号时, $p(t) < 0$,就表示这时元件吸收负的功率,实际上是在输出功率。式(1-3-1)适用于任何二端元件。



图 1-3-1 说明电路元件的功率的图

(a) u, i 参考方向一致; (b) u, i 参考方向相反

如果对一个二端元件,所取电压与电流的参考方向相反,如图 1-3-1(b)所示,则此二端元件所发出的功率等于 $u(t)$ 与 $i'(t)$ 的乘积,即

$$p(t) = u(t)i'(t) \quad (1-3-2)$$

当 $u(t), i'(t)$ 同号时,此功率为正;当 $u(t), i'(t)$ 异号时,此功率为负。

1.4 电阻元件

在电工中有着许多具有下述特性的一类二端器件,它们的端电压可表示为其中的电流的函数,或者器件中的电流可表示为其端电压的函数,亦即其端电压 u 与其中的电流 i 的关系可以用其伏安特性表示。这类器件都可以用电阻作为其电路模型,金属丝灯泡、电阻加热炉、实验室中用的各种电阻器都是这类器件的典型例子。

凡是其端电压与其中的电流成正比的电阻元件称为线性电阻。线性电阻的符号如图 1-4-1(a) 所示。一线性电阻的伏安特性是穿过原点的一直线,此直线的斜率即为它的电阻值,如图 1-4-1(b) 所示。

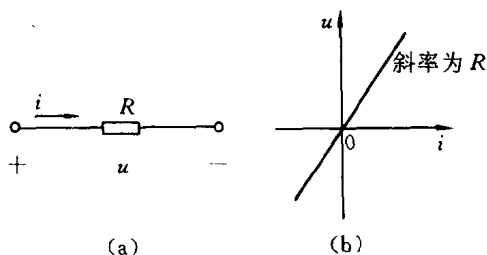


图 1-4-1 线性电阻的符号和它的伏安特性
(a) 符号; (b) 伏安特性

线性电阻的电压与电流的关系式就是欧姆定律

$$u = Ri \quad (1-4-1)$$

其中 R 就是电阻。式(1-4-1)又可写作

$$i = Gu \quad (1-4-2)$$

G 就是电导。线性电阻 R 与电导 G 有着互为倒数的关系,即