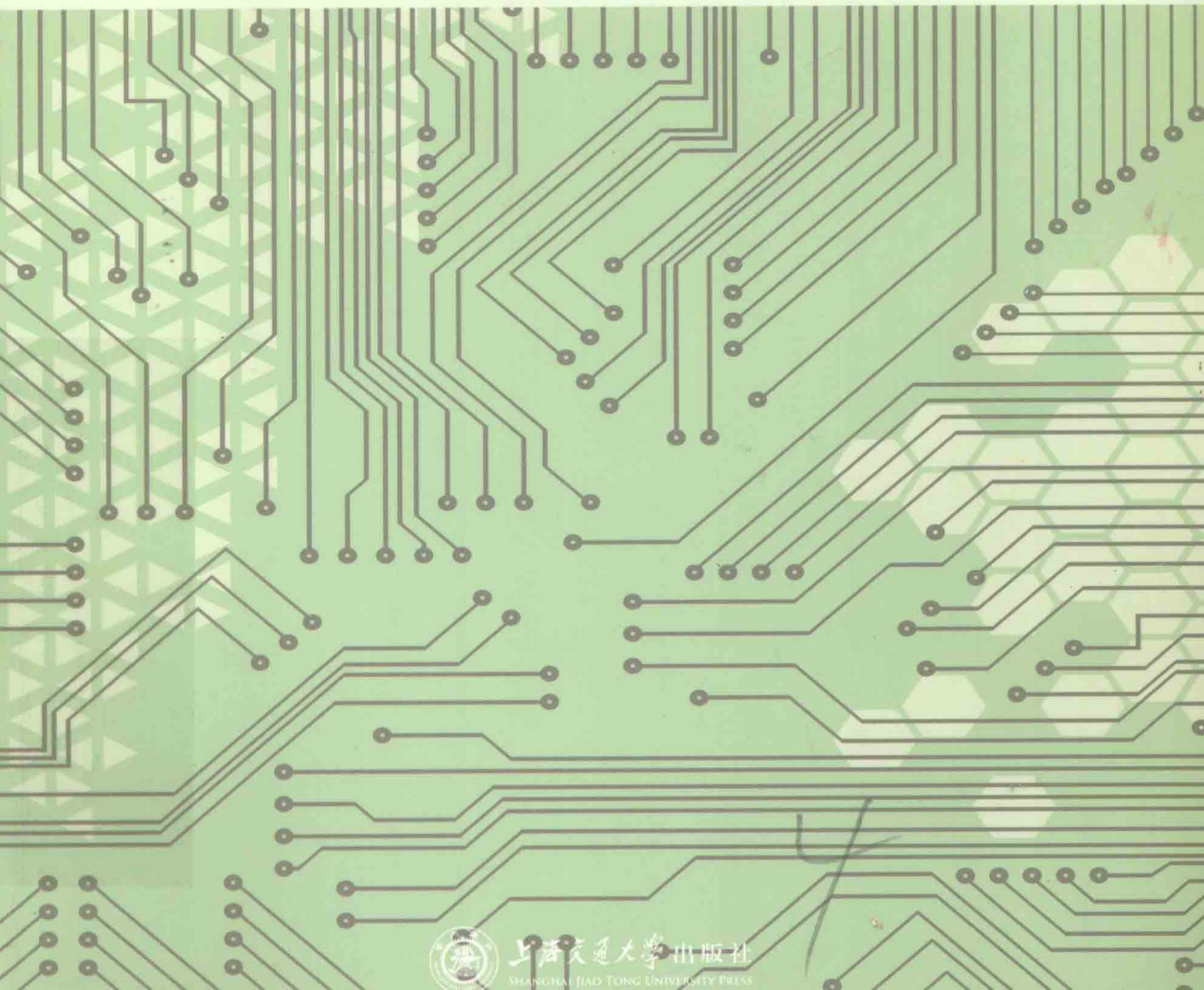




电路及模拟电子技术

(上册)

主 编 贾学堂
副主编 周燕军 刘国文



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

电路及模拟电子技术

(上册)

主 编 贾学堂

副主编 周燕军 刘国文

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书上册内容包括电路的基本概念、电路的基本定律、正弦交流电路、三相交流电路、电路的暂态分析、非正弦周期电路；下册内容包括电子器件放大电路基础、集成运算放大电路、信号处理电路、信号发生电路、直流稳压电源和电力电子技术基础共 13 章。每章附有小结、习题，书后附有大部分习题的参考答案。

本书可以作为高职高专电子信息工程技术、应用电子技术、机械制造与自动化、计算机应用技术、生产过程自动化等相关专业和电类专升本专业的教材；也可以作为一般本科少学时的电类专业和机械制造与自动化、机电一体化等相关专业的教材；还可以供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路及模拟电子技术. 上册/贾学堂主编. —上海：
上海交通大学出版社，2010
ISBN 978-7-313-06206-2

I. ①电… II. ①贾… III. ①电路理论—高等学
校—教材②模拟电路—电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM13②TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 012517 号

电路及模拟电子技术

(上册)

贾学堂 主编

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话：64071208 出版人：韩建民

常熟市梅李印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本：787mm×960mm 1/16 印张：14.75 字数：277 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

印数：1~3030

ISBN 978-7-313-06206-2/TM 定价：25.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

电路和模拟电子技术分上、下册出版,突出基本概念,兼顾高职高专培养应用性人才的教学需求,结合教改研究的任务和成果编写本书。

本书具有以下特点:体系结构合理、内容深入浅出、循序渐进、层次分明、重点突出、易教易学;在编写过程中较好地处理了“理论的严谨性”和“理论够用的实用性”(另有实验实训配套教材)的关系,有利于培养学生分析问题和解决问题的能力;模拟电子技术部分较大幅度地压缩了分立元件电路,加强了集成电路,比较贴近实际;具有模块化结构,只要合理取舍,提高拓宽内容(多数打*)和基本要求内容,可适用于不同层次和不同学时的需要;精选的习题覆盖面广,对读者深入理解正文内容有很好的辅助作用。书后所附的部分习题答案有利于读者自学,是培养分析问题和解决问题能力的抓手。

本书适用于讲课和实验(实训)72~90学时的专业。

本书由贾学堂教授担任主编,负责统稿和定稿,上册由周燕军、刘国文担任副主编,下册由徐意、蔡春燕担任副主编。参加编写工作的有徐意、周燕军、刘国文、蔡春燕、蒋洪明、汤峰平、陈晓贤、朱慧红等。其中,陈晓贤编写第1、7章,刘国文编写第2、10章,周燕军编写第3、12章,蔡春燕编写第4、10章,蒋洪明编写第5、13章,徐意编写第6、8、11章,汤峰平编写第9章。朱慧红副教授做了全部习题答案并审阅了全书。

本书编写过程中得到了许多同行、专家及领导的关心和支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不足和错漏之处恳请广大读者不吝批评指正。

编 者

2009年9月

目 录

上 册

第 1 章 电路的基本概念	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流和电压的方向	2
1.3 电路元件及性能方程	5
1.3.1 理想电路元件	5
1.3.2 电阻元件的性能方程	6
1.3.3 电感元件及性能方程	7
1.3.4 电容元件及性能方程	8
1.4 电功率和能量	9
1.5 电源	12
1.5.1 实际电压源和实际电流源及其等效变换	12
1.5.2 理想电压源和理想电流源	14
1.5.3 含独立电源电路的等效化简	15
1.5.4 受控电源	19
1.6 电路的三种状态	21
本章小结	25
习题	26
第 2 章 电路的基本定律和分析方法	30
2.1 基尔霍夫定律	30
2.2 无源二端网络的等效变换	36
2.2.1 电阻的串联和并联	37
2.2.2 电阻的星形(Y)联接和三角形(Δ)联接的等效变换	40
2.2.3 电感、电容的串并联	44
2.3 支路电流法	47

* 2.4	回路电流法	49
* 2.5	结点电压法	53
2.6	叠加定理	59
2.7	等效电源定理	62
2.7.1	戴维宁定理	62
2.7.2	诺顿定理	65
2.7.3	最大功率传输定理	69
2.8	电路中电位的计算	71
* 2.9	米勒定理	73
	习题	75
第3章	正弦交流电路	84
3.1	正弦电压与正弦电流	84
3.1.1	周期、频率与角频率	85
3.1.2	幅值与有效值	85
3.1.3	初相位与相位差	86
3.2	复数及其基本运算	88
3.2.1	复数及其表示形式	88
3.2.2	复数的运算	89
3.3	正弦量的相量表示法	90
3.4	简单的正弦交流电路的稳态分析	92
3.4.1	纯电阻元件的交流电路	92
3.4.2	纯电感元件的交流电路	94
3.4.3	纯电容元件的交流电路	97
3.5	复杂正弦交流电路的稳态分析	101
3.5.1	阻抗和导纳	101
3.5.2	电路定律的相量形式	105
3.5.3	阻抗的连接	106
3.5.4	正弦稳态电路分析的一般方法	110
3.5.5	功率及功率因数的提高	116
* 3.5.6	最大功率传输定理	124
* 3.6	交流电路的频率特性	126
* 3.6.1	RC串联电路的频率特性	126

3.6.2 电路的谐振	132
3.7 互感电路及变压器	139
3.7.1 互感	139
3.7.2 互感线圈的串并联	142
3.7.3 变压器	145
本章小结	149
习题	151
第4章 三相交流电路	158
4.1 三相电源	158
4.1.1 三相交流电动势的产生	158
4.1.2 三相电源的连接方法	159
4.2 对称三相电路的分析	161
4.2.1 Y-Y连接的对称三相电路	162
4.2.2 Y- Δ 连接的三相电路	163
* 4.3 不对称三相电路的分析	166
4.4 三相电路的功率	169
* 4.5 安全用电	172
本章小结	176
习题	177
第5章 电路的暂态分析	178
5.1 暂态分析的基本概念	178
5.1.1 电路的稳态与暂态	178
5.1.2 换路定则	179
5.1.3 初始值的计算	179
5.2 一阶电路	182
5.2.1 RC和RL电路的零输入响应	182
5.2.2 RC和RL电路的零状态响应	186
5.2.3 一阶电路全响应	190
5.2.4 一阶电路的三要素法	191
* 5.3 二阶电路分析的一般方法	197
本章小结	202

习题	203
* 第 6 章 非正弦周期电流电路	207
6.1 非正弦周期信号	207
6.2 周期函数分解为傅里叶级数	208
6.3 非正弦周期量有效值、平均值和平均功率	215
6.4 非正弦周期电流电路的稳态分析	217
本章小结	221
习题	221
部分习题答案	223
参考文献	228

第1章

电路的基本概念

电路是工科各专业尤其是电类专业重要的一门专业基础课,掌握电路的基本理论和分析方法,是学好后续相关课程的重要保证。

1.1 电路和电路模型

电路是实际电路及其模型的统称。实际电路是泛指由电源、电路器件(电阻、电感、电容等)和电子元件(三极管、运放、集成电路等)或电工设备构成的总体。

电路的功能大致上可以分为两类:一类是随着电流在电路中的流动,实现电能与其他形式能量的转换、传输和分配,例如发电厂将电能通过变压器送到用户,其示意图如图 1.1.1(a)所示。另一类是实现信号的传递和处理,例如收音机,将天线接受到的信号通过调谐环节选择所需的某个频率信号,再经过一系列的放大送到扬声器,其示意图如图 1.1.1(b)所示。

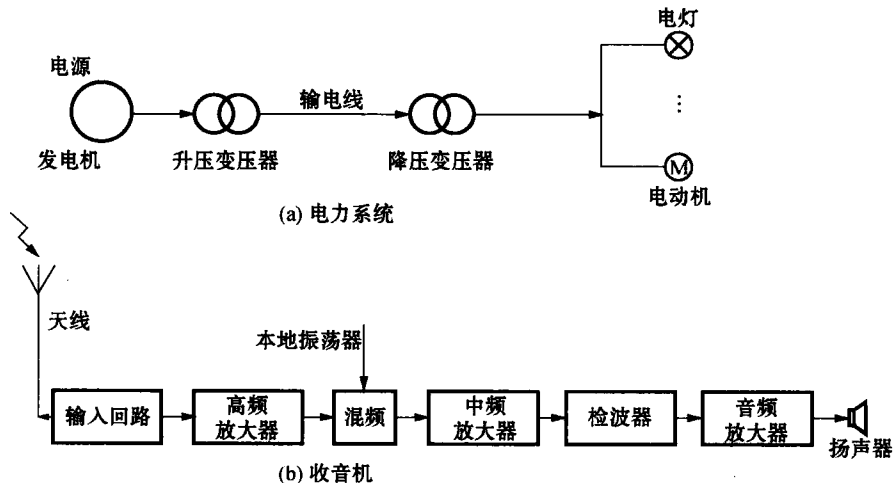


图 1.1.1 电路示意图

实际电路种类繁多、差异甚大,但无论何种电路,必由电源、中间环节和负载三大部分组成。每部分又由若干小部分组成,图 1.1.2(a)示出了最简单的手电筒结构示意图,左边是电源(干电池),中间环节为开关、导线,右边是负载(小灯泡)。

为了便于对实际电路进行分析和数学描述,将实际元件理想化,即在一定前提下,突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,得到所谓的理想电路元件。由理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型。应当注意本书所讨论的对象不是实际电路,而是电路模型,以后简称电路。图 1.1.2(b)是图 1.1.2(a)的电路模型,其中的理想电路元件常常简称为电路元件。

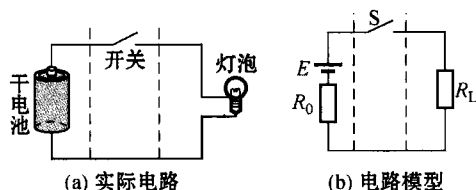


图 1.1.2 实际电路和电路模型

1.2 电流和电压的方向

电流、电压、电荷、磁通、功率及能量等均是电路中的基本物理量,常分别用 I , U , Q , Φ , P 和 W 表示,如果它们是随时间而变化的,则用对应的小写字母表示之。本节主要讨论电流和电压及其方向。

1. 电流

带电粒子定向运动的物理现象称为电流。带电粒子在金属导体中是指带负电的自由电子;在电介质中是指带电的正、负离子。电流的实际方向是指正电荷的运动方向。衡量电流大小的物理量称为电流,电流的数值是指在电场作用下,单位时间里通过导体横截面 S 的电荷量,如图 1.2.1 所示,其表达式为

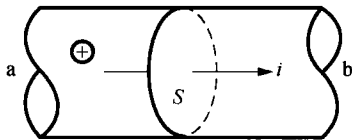


图 1.2.1 电流的示意图

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

在一般情况下,电流是随时间变化的,即为时间的函数。如果电流的大小方向均不随时间而变,则称为直流电流,用大写字母 I 表示:

$$I = \frac{Q}{t}$$

按国际单位制(SI)规定,电流*i*的单位是安培,简称安,用字母A表示;电荷*q*的单位是库仑,简称库,用字母C表示;时间*t*的单位是秒,用字母s表示。

电流的方向一般用箭头表示。通过一个元件的电流方向有实际方向和参考方向之分,实际方向是电流通过元件的真正流向,如图1.2.2中虚线所示的方向;参考方向则是人为假定,如图1.2.2中的实线所示。图1.2.2(a)中,参考方向与实际方向一致,电流*i*为正值,即*i* > 0;图1.2.2(b)中,参考方向与实际方向相反,电流*i*为负值,即*i* < 0。在实际电路中,电流的实际方向往往难以确定,也可能随时间而变化,因此,计算时采用参考方向,计算结果:*i* > 0,参考方向即实际方向;*i* < 0,参考方向和实际方向相反。此规定对下述电压的计算亦如此。

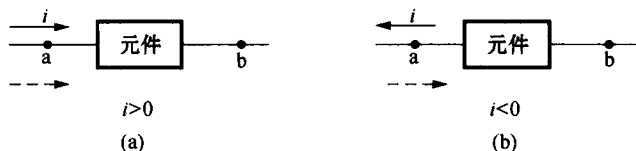


图 1.2.2 电流的参考方向

2. 电压

图1.2.3所示为电池中的两个电极,a是正极带正电荷,b是负极带负电荷。

在a、b两极之间产生了一个均匀而且恒定的电场,其方向是从a指向b。如果用导体将a、b两极连接起来,那么在电场作用下,电极a中的正电荷将通过导体移动到电极b。由于正电荷在电场中被移动了一段距离,电场力对正电荷做了功。我们把电场力将单位正电荷*q*从a点移动到b点所做的功称为a、b两点之间的电压,记为

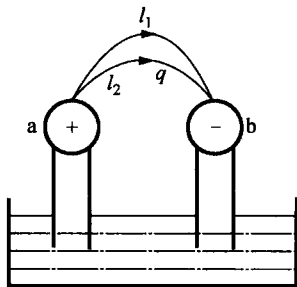


图 1.2.3 电压的示意图

$$U_{ab} = \frac{W_{q, ab}}{q} \quad (1.2.2)$$

大小和方向随时间变化而变动的电压称为交变电压,用小写字母*u*表示;如果电压的大小和方向都不随时间变动,则称为恒定电压或直流电压,用大写字母*U*表示。由恒定电压产生的电场是恒定电场,在恒定电场中,任意两点a、b之间的电压只与a、b两点的位置(起点与终点)有关,而和电荷移动的路径*l*₁还是*l*₂无关。

按国际单位制(SI)规定,电压 U 的单位为伏特,简称伏,用字母 V 表示,功 W 的单位是焦耳,简称焦,用字母 J 表示。

电压是标量,但为了分析计算方便,也规定其方向。电压实际的方向规定为“+”极性(高电位)端指向“-”极性(低电位)端,亦即电位降低的方向;电压的参考方向除用极性“+”、“-”表示外,也常用双下标表示,例如 a 、 b 两点间的电压用 u_{ab} 表示,有时亦用箭头表示,箭头若从 a 指向 b ,和 u_{ab} 的参考方向等价。和电流参考方向类似,若 $u_{ab} > 0$,则表示参考方向和实际方向相同;若 $u_{ab} < 0$,则表示参考方向和实际方向相反。图 1.2.4(a)、(b)分别示出了它们实际方向和参考方向的关系。

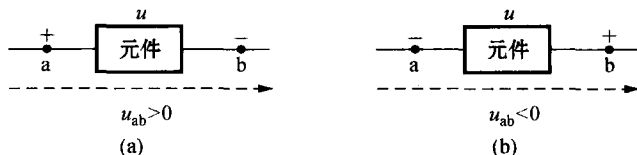


图 1.2.4 电压的参考方向

3. 电动势

电动势是一个描述电源内部的物理量。在图 1.2.3 中可见,由于电场力的作用,正电荷不断地从 a 极经过导体到 b 极,其结果势必会改变电荷的分布。 a 极的正电荷数不断减少,电位逐渐下降,而 b 极不断的得到从 a 极移来的正电荷,电位不断升高。随着时间的推移, a 、 b 两极之间的电位差将越来越小,它所产生的电场也就越来越弱,一旦 a 、 b 两极的电位相等时,导体中不再有电荷的移动。为了维持导体中电荷源源不断地移动,必须要有一种外力克服电场力的作用,从另一条途径源源不断地把正电荷从低电位端(b 极)移到高电位端(a 极),使 a 极的电位升高,以保持导体中正电荷不断移动。在电源内部就存在着这种外力。外力把正电荷从低电位端 b 经过电源内部移动到高电位端 a 所做的功称为电源的电动势,用 E 表示。

在国际单位制中,电动势的单位也是伏[特(V)]。

必须注意:在电源内部电动势 E 的方向规定为从低电位端指向高电位端。换句话说,当电动势是正时,电动势的方向是电位升高的方向。其次,电动势 E 在数值上与电源的开路电压相等、方向相反。因为当电源处于开路状态时,电源中没有电荷的移动,这时电场力与外力相平衡,电场力和外力对正电荷做功的能力相等。

4. 电位

电路中任意一点对参考点的电压称之为电位,单位和电压相同也是伏(V)。电路中参考点的电位(也称基准点)为零,常用接地符号“ \perp ”表示,但并非真与大地相接。参考点原则上可以任取,但往往取多数元件的汇集点。

电位和电压既密切相关又有区别,电路中某一点的电位等于该点与参考点之间的电压;电位的数值因参考点的选取不同而异,而电压的数值与参考点的选取无关;电位一般用单下标表示,例如 U_a ,就代表a点对参考点的电位,而电压一般用双下标表示,例如 U_{ab} ,代表a、b两点之间的电位差($U_a - U_b$)。关于电位的具体计算将在后面涉及。

1.3 电路元件及性能方程

1.3.1 理想电路元件

前已提及,电路的理想元件是实际电路元件主要电磁特征的抽象概括。按经典电路理论,理想电路元件共有五种:电阻、电感、电容、电压源、电流源,其符号如图1.3.1所示。

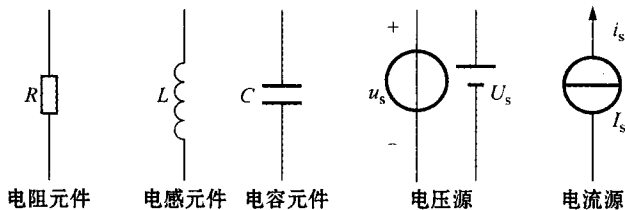


图 1.3.1 理想电路元件名称及符号

电阻元件是一个耗能元件,它消耗电能并把电能转化为热能和光能,用符号 R 表示。电感元件和电容元件都是储能元件,也称为动态元件。电感元件能把电能转化为磁场能量储存在电感线圈中,用符号 L 表示。电容元件能把电能转化为电场能储存在电容器中,用符号 C 表示。电压源也称理想电压源,是实际电压源的抽象,它两端的电压固定不变,且所通过的电流可以是任意值,其大小取决于与它相联的外电路,用符号 u_s 表示。电流源也称为理想电流源,是实际电流源的抽象,它向外提供一个恒定不变的电流,其两端的电压可以是任意值,其大小取决于与它相连接的外电路,用符号 i_s 表示,其中 U_s 和 I_s 代表恒定电源或直流电源。

每一种电路元件,按与外部联接的端子数目可分为二端元件、三端元件与四端元件等。电路元件还可分为线性元件和非线性元件;时不变元件和时变元件;无源和有源元件;集总参数元件和分布参数元件等,以后各章在不加说明的前提下,所指元件均是指线性、时不变的集总元件。前面提到的五种理想元件为二端元件。

1.3.2 电阻元件的性能方程

在电压和电流取关联参考方向的前提下,即两者的参考方向相同,如图 1.3.2(a)所示,在任何时刻电阻两端的电压和电流满足性能方程(欧姆定律),即

$$u = Ri \quad (1.3.1)$$

如令 $G = \frac{1}{R}$, 则式(1.3.1)可写成

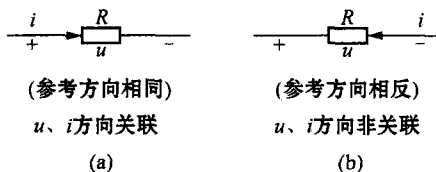
$$i = Gu \quad (1.3.2)$$

在国际单位制(SI)中,电阻 R 的单位为欧姆,简称欧,用字母 Ω 表示。电阻的倒数称为电导,用 G 表示,单位是西门子,简称西,用字母 S 表示。

如果电压、电流方向非关联,如图 1.3.2(b)所示,则

$$u = -Ri \quad (1.3.3)$$

$$i = -Gu \quad (1.3.4)$$



在直流情况下, u 和 i 一般常用大写,即

$$U = \pm RI$$

$$I = \pm GU$$

图 1.3.2 欧姆定律

如果在一条支路中,既有电阻又有电动势,则这条支路称为含源支路,如图 1.3.3 所示,该含源支路 ab 有两个电阻 R_1, R_2 及两个电动势 E_1, E_2 。首先假定该支路电压、电流的参考方向(如图示),按假定的参考方向可写出 $a、b$ 两点之间的电压

$$U_{ab} = R_1 I + E_1 + R_2 I - E_2$$

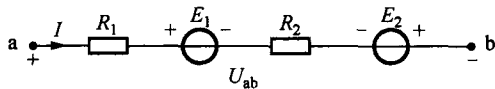


图 1.3.3 含源支路欧姆定律

经整理后得到

$$I = \frac{U_{ab} + (E_2 - E_1)}{R_1 + R_2}$$

如果含源支路 $a、b$ 两点间含有多个电阻及多个电动势,那么,就可以写出

$$I = \pm \frac{U_{ab} + \sum(\pm E)}{\sum R} \quad (1.3.5)$$

式(1.3.5)中的分母是含源支路中所有电阻的代数和;分子是该含源支路两端的电压和含源支路中所有电动势的代数和。当端电压 U_{ab} 与电流 I 的参考方向关联时,表达式取“+”,反之,取“-”;当电动势 E 与电流 I 的参考方向非关联时,电动势取“+”,反之取“-”。这里要注意,电动势 E_i 和其端电压 U_i 的方向相反。

1.3.3 电感元件及性能方程

电感元件是实际空心线圈或铁心的线圈的理想化的模型,如图 1.3.4(a)所示。

设线圈有 N 匝,当线圈通以电流 i 时,便产生自感磁通 Φ_L ,线圈各匝产生磁通的总和称为自感磁通链 Ψ_L ,其值为 $\Psi_L = N\Phi_L$,根据电磁感应定律,可得

$$u = \frac{d\Psi_L}{dt} \quad (1.3.6)$$

线性电感元件的自感磁通链 Ψ_L 与线圈中通过的电流 i 成正比关系,即 $\Psi_L = Li$ 。式中 L 称为该元件的自感系数,简称为电感,显然 L 是一个正实常数。

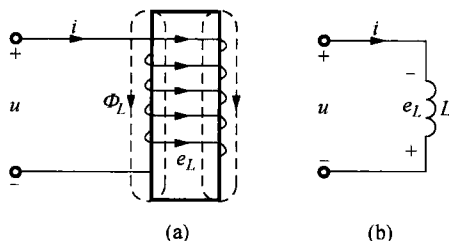


图 1.3.4 电感线圈及等效电路

电感线圈在电压和电流方向相关联且 i 和 Φ 满足右螺旋定则的情况下,产生的自感电动势 e_L 可用图 1.3.4(b)等效,其表达式为

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1.3.7)$$

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1.3.8)$$

式(1.3.8)称为电感的性能方程。

在国际单位制(SI)中,磁通链的单位是韦伯,简称韦,用字母 Wb 表示,电感 L 的单位是亨利,简称亨,用字母 H 表示。

由式(1.3.7)可见,当电流的正值增大时,即 $\frac{di}{dt} > 0$ 时,则 e_L 为负值,即其实际

方向与电流的方向相反。这时 e_L 要阻碍电流的增大。同理,当电流的正值减小时,即 $\frac{di}{dt} < 0$ 时,则 e_L 为正值,即其实际方向与电流的方向相同。这时 e_L 要阻碍电流的减小。可见,自感电动势具有阻碍电流变化的性质,所以要外加电压平衡线圈中的感应电动势。

当线圈中通过不随时间而变化的恒定电流时,由式(1.3.8)可知,其电压为零,电感元件可视为短路。

1.3.4 电容元件及性能方程

两块金属板之间充以不同介质(如云母、绝缘纸、电解质等),就构成了实际电容器,而电容元件则是实际电容器的理想模型。在电源作用下,两极板上会聚集等量的异性电荷,但由于被介质隔开,不能中和,只能相互吸引,故移去电源,两极板上的电荷得以保留而长期存储下去,因此电容器是一种能存储电荷或存储电场能量的部件。

线性电容元件,在电压、电流参考方向关联的情况下,如图 1.3.5 所示。

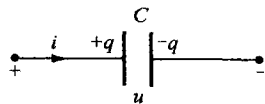


图 1.3.5 电容元件的库伏关系

两极板上存储的正、负电荷 q 和端电压 u 成正比,即 $q = Cu$ 。

式中 C 称为电容,显然 C 也是一个正实数。

$$\text{又因为} \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (1.3.9)$$

故

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.3.10)$$

式(1.3.10)称为电容的性能方程,它表明了电流与电压的变化率成正比。当电容的端电压发生剧变,即 $\frac{du}{dt}$ 很大时,电流亦很大;当电压不随时间变化时,电流为零,电容相当于开路,也就是电容具有隔断直流的作用,在电子电路中常简称为隔直。

在国际单位制(SI)中,电容的单位是法拉,简称法,用字母 F 表示。

以上介绍的各物理量的单位,均是指在国际单位制(SI)中的单位,但有时(SI)制中单位太大或太小,为了表述方便,常常采用更大或更小的单位,它们和(SI)制中的单位相比较有固定的倍数关系,表 1.3.1 反映了这种关系。

表 1.3.1 SI 制中各物理量的单位与常用单位的关系

倍率	词头名称		词头符号	倍率	词头名称		词头符号
10^{12}	太(拉)	tera	T	10^{-1}	分	deci	d
10^9	吉(咖)	giga	G	10^{-2}	厘	centi	c
10^6	兆	mega	M	10^{-3}	毫	milli	m
10^3	千	kilo	k	10^{-6}	微	micro	μ
10^2	百	hector	h	10^{-9}	纳(诺)	nano	n
10	十	deca	da	10^{-12}	皮(可)	pico	p

掌握 SI 制中的单位和常用单位的转换在计算时十分重要,因为给定的各种公式都是在满足参考方向关联和 SI 制中的单位的前提下才成立。

无论何种物理量在 SI 制的单位前冠以相同的词头,其含义相同。

例如:

$$\begin{aligned} \text{kV(千伏)} &= 10^3 \text{ V}, \text{ kA(千安)} = 10^3 \text{ A}, \text{ k}\Omega(\text{千欧}) = 10^3 \Omega, \\ \mu\text{V(微伏)} &= 10^{-6} \text{ V}, \mu\text{A(微安)} = 10^{-6} \text{ A}, \mu\text{F(微法)} = 10^{-6} \text{ F}. \end{aligned}$$

另外还有一些常用单位,不能用表 1-1 中的词头加 SI 制中的单位表示,例如,电能的单位千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)又称度。

1.4 电功率和能量

电功率和能量的计算,在电路分析中占有重要的地位,这是因为电路在工作时总伴随着电能和其他形式的能量交换;而另一方面电气设备和电路元件本身都受电流、电压和功率的限制,任何一个量超过额定值都将使设备和部件不能正常工作,甚至损坏。

电功率与电压、电流密切相关。当正电荷从元件上电压的“+”极经元件运动到电压的“-”极时,与此电压相应的电场力要对电荷做功,这时,元件吸收能量;反之,正电荷从电压的“-”极经元件运动到电压“+”极时,电场力作负功,元件向外释放电能。

从 t_0 到 t 的时间内,元件吸收的电能可根据电压的定义(A、B 两点的电压在量值上等于电场力将单位正电荷由 A 点移动到 B 点时所作的功),可求得

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$