

WUHAN DAXUE CHUBANSHE

高等电路

GAODENG DIANLU



陈崇源 主编

武汉大学出版社



TM13
C37-2

高 等 电 路

陈崇源 孙亲锡 颜秋容

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高等电路/陈崇源主编;孙亲锡,颜秋容著. —武汉:武汉大学出版社,2000.3
ISBN 7-307-02926-x

I. 高… II. ①陈… ②孙… ③颜… III. 电路理论—高等学校—教材
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 15901 号

DZ16 25

责任编辑:陈礼榕 版式设计:支 笛

出版:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:epd@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

发行:新华书店湖北发行所

印刷:湖北省通山县印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:37.875 字数:1082 千字

版次:2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-02926-x/TM·1 定价:48.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 提 要

本书是为电路理论课程而编写的教材,具有起点较高、难度较大、涉及面较广的特点。该书在阐述电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法的同时,还着重加强对学生分析问题、解决问题的能力及创新能力和基本素质等方面进行训练和培养。

本书兼顾了近代电路理论的一些新内容,又保留传统电路理论的基本特点,在某些方面提出了一些独特的、新颖的见解和论述,颇具启发性,便于自学。

全书共分十五章。第一章~第五章为电阻性网络分析及电路元件特性。第六章、第七章为动态网络的时域分析。第八章~第十一章为频率域网络及复频域网络分析。第十二章、第十三章为端口网络方程分析和状态方程。第十四章、第十五章为均匀传输线的稳态及暂态分析。

本书各章都编有专门的一节例题精讲,这些例题有一定的难度和典型性,有些例题可以看成是本章基本内容的延伸,可供读者参考。

各章都附有一定数量的习题,这些习题有些是基本的,有些具有一定的难度,可作为学习本课程的基本训练和进一步深化的题材。所有的习题都附有答案,可供读者检验。

此外,为了教学需要,本书还以附录形式编写了一章《磁路与铁心线圈》。

本书既是一本教科书,也是一本教学参考书,可供电类专业本科生、研究生及有关工程技术人员参考和使用。

本书由陈崇源教授主编,其中第一章~第五章及第七章由孙亲锡副教授编写,第六章,第八章~第十一章由颜秋容副教授编写,其余各章由陈崇源教授编写。

前 言

电路理论是一门很重要的技术基础课,它为从事电工领域的学习和工作打下坚实的基础,为今后开展电工领域的科学技术研究铺平道路。

电路理论的重要性,不仅在于通过本课程的学习,学得电工原理的基本理论、基本概念和基本分析方法,更重要的还在于学习和掌握这些知识的同时,能够在思维上得到锻炼,在分析问题和解决问题的能力上得到培养和提高。电路理论把电工原理的基本知识和数学分析的基本内容紧密地联系起来,为运用所学过的数学分析的知识提供了一个很好的巩固、深化和提高的场所。可以通过电路理论课程的学习,提高读者的数学分析的素质和水平,从而使人变得聪明起来,富于创新、敢于创新。

学习电路理论,要注意建立电路的基本概念,要认真画好电路图,并在电路图中清晰地标示出各支路电压及各支路电流变量,以及它们的假定正向。这样,才能自如地将电工技术上的问题,归结到电路图中进行分析和研究。电路图是分析有关电工技术中电路问题的载体,离开了电路图就等于脱离了分析电路问题的对象,那是无法对电路进行分析的。

在学习电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法时,还要从电路模型和数学模型这两个方面去进行分析和探讨,从中领悟出各种概念和方法的物理本质,要从这两个方面的理解过程中加深记忆,在加深记忆的过程中深化这两方面的理解。力求将电工原理的基本概念、基本原理和基本分析方法在头脑中生根,成为常识,从而学得深刻、记得牢固、用得灵活、自如。

电路理论的基本定律是基尔霍夫电流定律 KCL、基尔霍夫电压定律 KVL 以及各种元件的性能方程 VCR 。在讨论和运用这些定律、以及由此而建立的电路理论的各种方法去分析电路时,要注意理解支路的概念和各支路电压、电流的假定正向,以及有关假定正向的约定规则,运用代数思维的模式去建立正确的求解方程。要从算术思维的模式中解脱出来,进入到代数思维的模式及复数和矢量运算等范畴,不要让算术思维模式成为学习电路理论课程的桎梏。

电路理论的分析方法,可以分为以下三种类型:

1. 网络的等效变化及其化简的方法。
2. 网络的各种方程分析法。
3. 网络定理及在分析电路问题中的应用。

此外,在分析电路问题时,常常将上述三种类型的分析方法进行综合、灵活的运用,以求问题得到最简明的解决。通常在求解电路问题时,将电路进行适当的、必要的简化,可使求解过程方便。在学习电路理论时,要注意从这三种类型分析方法的角度去认识、领会和理解,要养成分析的习惯。要分清条件和情况,选用最佳的分析问题的方法和思路去求解电路问题,不能盲目地、想当然地套用公式,导致出现概念性的错误。

全书共有十五章,可以分成以下几个部分:

1. 电阻网络的分析(第一章~第五章)。
2. 动态网络的时域分析(第六章、第七章)。
3. 频率域网络的分析(第八章~第十章)。
4. 复频域网络的分析(第十一章)。
5. 端口网络方程及状态方程的分析(第十二章、第十三章)。

6. 均匀传输线的稳态与暂态分析(第十四章、第十五章)。

这些篇幅都是从不同的层面来阐述电路理论的三种类型的分析方法的。在电阻网络这一部分中,全面地论述电路理论的各种分析方法,以及有关的原理和概念,是全书的基础。后面的几个部分,是在这个基础上分别着重论述各个篇幅中的特定问题,以及对这些特定问题的处理手段和方法,可以说是电阻网络分析的螺旋式攀升、深化和发展,彼此间的内在联系非常密切,应学会“举一反三”地辩证理解和认识。

电路理论课程历来为各界人士所重视,也是学生感兴趣的一门课程,虽然学起来有一定的难度,但是可以对学生的基本素质进行训练和培养,使人更加耐心、更加谨慎、更加细致和灵活,更有创新性。在我们多年的教学生涯中,不少学生在学完电路理论课程后,深有感触地说,通过本课程的学习,确实使人变得聪明起来,电路理论堪称电气工程技术人员奶油和面包。

本教材是我们多年从事电路理论课程教学的结晶,是在电工原理这块土地上长期耕耘付出心血的结果。教材中的许多提法、概念和方法是我们提出的,也是我们长期进行电路理论教学的心得和体会,反映了我们的教学风貌。这些概念、方法和内容颇为独特、新颖,思路可使人受到启发。多年来获得优秀的教学效果,得到了学生们的欢迎和好评。

教材中的每一章都安排了一节例题精讲。力图从这些例题的剖析、讨论,使读者对电路理论的基本概念、基本理论和基本分析方法得到进一步的深化,对全章有一个全面的、综合的、辩证的认识和理解,以便打开思路、扩大视野,提高能力,达到举一反三的效果。例题内容丰富、广泛,有足够的深度、难度和代表性,具有启发性。

本教材的每一章都附有足够数量的习题,这些习题中有一些是基本的,难度不大。而另一些题目综合性较强,因而难度也较大,但它们与本教材的内容联系紧密,对于电路理论的学习,以及分析问题、解决问题和创新能力的提高,都是大有裨益的,读者可以把这些习题看成是本教材内容的继续和补充。为了便于读者自学,各章的习题都附有参考答案,以供读者检验。

本教材有足够的深度、难度和广度,具有一定的水平。虽然篇幅较大,字数较多,但通俗易懂,深入浅出,便于阅读,有利于教学。倘若读者能够学完本教材,读通了所有的例题,并且认真地、正确地做完了所有的习题,那么在电路理论方面就能打下扎实的基础,这对于今后的工作和学习都会是受益匪浅的。在我们所教过的学生中,不少人毕业后谈过这方面的感受。

倘若奉献给读者的这本教材,能够在电路理论的学习方面有所开拓、有所得益、有所启发,并且获得认同和满意,那么我们将会感到宽慰,也不枉我们大半生在这方面的投入。但是,金无足赤、玉亦有瑕,书中可能会有些失误和不当之处,诚请读者提出宝贵的意见,以便对拙著进一步修改、完善和提高。

此外,为了满足需要,本书还以附录的形式编写了一章《磁路与铁心线圈》。

本书的出版发行,得到了有关领导及武汉大学出版社的大力支持和帮助,在此表示感谢。

本书由张肃文教授主审,提出了许多宝贵的意见,保证了本书的质量。陈礼榕同志对本书作了大量的编辑、加工,使本书大大增色,在此表示衷心的感谢和崇高的敬礼。

张文灿教授,周泰康教授,戴旦前教授对本书的出版作了大力的推荐,在此表示诚挚的感谢和崇高的敬意。

李玉国女士精心绘制了本书所有的图,在此表示深深的感谢。

谨以此书迎接 21 世纪的到来。

作者 陈崇源 孙亲锡 颜秋容

1999 年 6 月于华中理工大学

目 录

第一章 电路及电路的基本定律	1
1-1 电路及电路图	1
1-2 电路中的基本电磁物理量	2
1-3 集中参数电路的基尔霍夫定律	9
1-4 电阻性元件	14
1-5 独立电源	18
1-6 广义函数及其微积运算	20
1-7 电容性元件	27
1-8 电感性元件	31
1-9 实际元件和实际电路	34
1-10 例题精讲	35
习题	38
第二章 简单电路及其等效变化	41
2-1 一端口电阻网络的串联、并联及混联	41
2-2 Y/Δ 、 Δ/Y 及星/网等效变化	46
2-3 求特殊一端口网络的入端电阻的特殊方法	49
2-4 含源支路的等效变化	52
2-5 受控电源及理想运算放大器	56
2-6 含理想运算放大器电路的分析	59
2-7 含受控电源支路的等效变化	62
2-8 线性时不变电容器及电感器的串并联	64
2-9 例题精讲	69
2-10 电阻性网络的综合	73
习题	75
第三章 网络图论简介	80
3-1 概述	80
3-2 图论的基本概念、名词及术语	81
3-3 图的矩阵表述	88
3-4 例题精讲	95
习题	99

第四章 电阻网络分析方程	101
4-1 $2B$ 变量分析法	101
4-2 支路变量分析法	108
4-3 节点电位分析法	113
4-4 网孔回路电流分析法	119
4-5 基本回路电流分析法及基本割集电压分析法	124
4-6 例题精讲	128
4-7 对偶网络及对偶原理	133
4-8 电容网络及电感网络的分析方程	133
习题	134
第五章 网络定理	138
5-1 替代原理	138
5-2 叠加原理	140
5-3 等效电源定理	144
5-4 特勒根定理	151
5-5 互易网络中的互易原理	154
5-6 参数变动的补偿原理	159
5-7 传递对称二端口网络的中分定理	162
5-8 最大功率传输定理	166
5-9 例题精讲	167
5-10 再论松弛一端口网络入端电阻的求法	173
习题	177
第六章 动态电路的时域分析	182
6-1 动态电路时域分析微分方程式的建立	183
6-2 不含有冲激系列电源激励下网络的初始条件决定	185
6-3 线性常系数常微分方程的数学解法	190
6-4 一阶电路的零输入响应	193
6-5 一阶电路的零状态响应	198
6-6 一阶电路的全响应	202
6-7 一阶电路过渡过程的三要素求解法	204
6-8 过渡过程中的过渡过程	212
6-9 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	214
6-10 线性时变及非线性电路的过渡过程	218
6-11 二阶电路的零输入响应	222

6-12	二阶电路的阶跃响应与冲激响应	228
6-13	例题精讲	232
习题		245
第七章	任意波形激励下的零状态响应	253
7-1	网络的冲激响应和阶跃响应	253
7-2	任意波形激励下的零状态响应——卷积积分公式	255
7-3	卷积积分的分析和计算	257
7-4	卷积积分体现的因果关系	266
7-5	杜阿美尔积分	267
习题		267
第八章	正弦稳态分析	270
8-1	正弦量的基本概念	270
8-2	正弦量的复数(相量)计算法	273
8-3	线性时不变元件的电压、电流相量分析及其功率	276
8-4	R 、 L 、 C 元件的串联与并联	282
8-5	正弦稳态电路的相量分析法	290
8-6	正弦稳态电路的矢量图及波形图分析法	295
8-7	电路的谐振	302
8-8	最大功率传输定理	308
8-9	耦合电感器及含耦合电感器电路的分析	309
8-10	理想变压器	319
8-11	例题精讲	322
习题		341
第九章	正弦三相电路	349
9-1	概述	349
9-2	三相电路的基本概念	349
9-3	对称三相电路的分析和计算	354
9-4	不对称三相电路的分析和计算	356
9-5	三相电路的功率及其测量	358
9-6	例题精讲	361
习题		366
第十章	周期性非正弦稳态电路分析	368
10-1	谐波分解与谐波阻抗	368

10-2	非正弦电路的分析和计算	372
10-3	非正弦对称三相电路	378
10-4	例题精讲	380
	习题	386
第十一章 网络的复频域分析法		391
11-1	拉普拉斯变换	391
11-2	拉普拉斯变换的性质	393
11-3	拉普拉斯反变换的求法	397
11-4	拉普拉斯变换在求解电路过渡过程中的应用	401
11-5	网络函数	406
11-6	例题精讲	416
	习题	427
第十二章 二端口网络		430
12-1	概述	430
12-2	二端口网络的 Y 参数及方程	431
12-3	二端口网络的 Z 参数及方程	433
12-4	二端口网络的 H 参数及 G 参数方程	434
12-5	二端口网络的传输参数及方程	436
12-6	小结	438
12-7	互易二端口网络参数的实验测定	441
12-8	有载二端口网络的人端阻抗及阻抗变换器	442
12-9	对称二端口网络的特征阻抗及传播特性	444
12-10	二端口网络的联接	445
12-11	例题精讲	448
12-12	多端口网络与不定导纳矩阵	459
	习题	461
第十三章 状态变量分析		465
13-1	概述	465
13-2	状态方程的视察法列写	468
13-3	常态网络状态方程的系统法列写	471
13-4	状态方程的直流叠加法列写	472
13-5	线性时变网络及非线性网络的状态方程列写	475
13-6	状态方程的解	477
13-7	例题精讲	482

习题	489
第十四章 均匀传输线的正弦稳态分析	491
14-1 均匀传输线的偏微分方程	491
14-2 均匀传输线的正弦稳态解	492
14-3 均匀传输线与二端口网络	497
14-4 入端阻抗,参数测定及链式造型	500
14-5 无畸变线及无损耗线	503
14-6 例题精讲	508
习题	513
第十五章 无损耗均匀传输线的暂态分析	515
15-1 无损耗均匀传输线的波动方程及其解	515
15-2 无损耗均匀传输线上的发出波	517
15-3 无损耗均匀传输线暂态过程的复频域解	520
15-4 终端负载的反射	522
15-5 求解波过程的柏德生法则	526
15-6 波的多次反射	533
15-7 例题精讲	536
习题	542
附录 A 磁路与铁心线圈	544
A-1 磁路与铁磁材料	544
A-2 磁路的基本定律	547
A-3 直流磁路的计算	551
A-4 磁场能量与磁场力	560
A-5 磁饱和与磁滞对电压、电流及磁通波形的影响	561
A-6 铁心中的功率损耗	563
A-7 铁心线圈	566
A-8 例题精讲	569
习题	572
附录 B 习题参考答案	576
主要参考文献	593

第一章 电路及电路的基本定律

本章主要阐述电路的概念及构成电路的基本元件,阐述电路的基本电磁物理量和电路所遵循的基本定律,这些都是电路理论的基础,整个电路理论的大厦就是建立在这些基础之上的。

1-1 电路及电路图

1-1-1 电 路

电路是电磁场的特定形式,它是根据一定的要求,将电源(或信号源)、用电设备(如马达、音响、灯泡等)通过导线,开关、控制操作等中间环节相互连接而构成的总体。电路给电流提供通路,通过电流在电路中流动所产生的各种效应,或者进行机电能量转换,或者对信号进行加工处理等,从而实现各种电气设备所设定的各种功能,为人类的生产和生活服务。

例如,一个简单的手电筒就可以称为一个电路,一台电视机或者一台收录机也可以称为一个电路。对于结构比较复杂、规模比较巨大的电路,常称它为电网络或简称为网络。例如,一个电力系统,从发电厂的各台发电机到输变电设备和各工厂的用电设备总合起来,就是一个电路,这样的电路常常被称为电网络。当研究一般性的抽象规律时多用网络一词,而讨论某些具体指定的问题时又称为电路。在本书中,电路和电网络这两个词具有通用性。

任何一个电路或电网络,总可以把它区分为电源(或信号源)、用电设备及中间环节与连线这样的三大部件。

1-1-2 电 路 图

电路图是用一定的文字及图形符号来表示电路的各个元件或部件,并按照实际电路的情况,用连线将它们联成一个整体的图形。电路图是实际电路的抽象表述。

人们总是通过电路图来分析和计算实际电路中各个元件上的电压及电流的。作为一个电气工程技术人員要重视电路图,要善于将一个实际电路抽象为电路图来进行分析,它是分析电路问题的载体。常用的电路元件符号如表 1-1 所示。

表 1-1 常见的电路元件符号

元件名称	独立电压源	独立电流源	刀 闸	电 阻 元 件	电 容 元 件
图 示 符 号					
元件名称	电 感 元 件	运 算 放 大 器	受 控 电 流 源	受 控 电 压 源	耦 合 电 感 器
图 示 符 号					

1-2 电路中的基本电磁物理量

任何一个物理过程及物理现象,都必须用一些基本物理量来描述和度量。正如质点在空间中运动时,需要用到距离、时间、速度、加速度、质量、动量及能量等物理量来描述和度量一样,在研究和分析电路时,同样也需要用到一些基本物理量,这些物理量与电磁现象有密切的关系,所以称它们为电磁场物理量。电路中常用到的电磁物理量有电荷、电流、电压、电位、电动势、磁通及磁链、电功率和能量等。

1-2-1 电 流

电流是一种自然现象,电荷的有序运动或电场的有序变化就形成电流,电流的出现离不开电场。电流在电路图中用英文大写字母 I 或小写字母 i 及一个小箭头来表示,不同支路的电流用下标加以区别,例如 I_1 、 I_2 或 i_1 、 i_2 等。自然界中存在着传导电流、运流电流和位移电流三种类型的电流。

一、电流的种类

1. 传导电流

传导电流是导电媒质(如金属导体或电解液)中自由电子或带电离子在电场力作用下的有序运动所形成的电流。

2. 运流电流

运流电流是带电体在空间作有序运动所形成的电流。与传导电流不同的是,产生运流电流的带电体可能是不连续的,它所形成的电流可能是时间和空间的离散函数。本课程一般不涉及这种类型的电流。

3. 位移电流

位移电流是真空及电介质在变化的电场中电场强度的有序变化,以及由于极化引起束缚电荷作有序变化所形成的电流。位移电流的概念是麦克斯韦首先以假说的形式提出来的,然后通过实践证实了它的正确性。提出了位移电流的概念后,才建立了完整的电磁场理论。

二、电流强度和电流密度

电流强度和电流密度都是对电流这一物理现象进行度量的物理量。在电路理论中常常把电流强度简称为电流。

1. 电流强度及电流密度的定义

电流强度的定义是,单位时间内通过某一截面的电荷量。其数学定义式为

$$i = dq/dt \quad (1-2-1)$$

电流密度的定义是,单位时间内垂直通过单位面积的电荷量,它是矢量,其矢量的正方向规定为单位面积元的外法线方向。若用 $\vec{\delta}$ 表示电流密度矢量, $\vec{n}^0$ 表示单位面积元的单位外法线矢量,则电流密度矢量的数学定义式为

$$\vec{\delta} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} \vec{n}^0 \quad (1-2-2)$$

2. 电流强度与电流密度矢量的关系

根据电流强度和电流密度矢量的定义,可推得如下关系

$$i = \int_S \vec{\delta} \cdot d\vec{S} \quad (1-2-3)$$

由此可见,电流强度*i*是电流密度矢量 $\vec{\delta}$ 的面积分量,是一个代数量,只有流入节点(或流入闭合面)及流出节点(或流出闭合面)之分,所以在电路图中可以用箭头来表示它的流向。而电流密度矢量 $\vec{\delta}$ 是一个“场量”,它是时间和空间的函数。

3. 电流密度矢量与电场的关系

在电场中,若电场强度为 $\vec{E}$,导电媒质的电导率为 γ ,则传导电流密度矢量 $\vec{\delta}_c$ 为

$$\vec{\delta}_c = \gamma \vec{E} \quad (1-2-4)$$

若带电体的电荷体密度为 ρ ,运动速度为 $\vec{v}$,则运流电流密度矢量 $\vec{\delta}_\rho$ 为

$$\vec{\delta}_\rho = \rho \vec{v} \quad (1-2-5)$$

若电场的电位移矢量为 $\vec{D}$,则电介质中位移电流密度矢量 $\vec{\delta}$ 为

$$\vec{\delta} = \partial \vec{D} / \partial t \quad (1-2-6)$$

三、电流强度与电流密度的单位

电流强度的 SI 单位是安[培],也可用 A 表示。

$$1 \text{ 安[培]} = 1 \text{ 库[仑]} / \text{秒} \quad (1-2-7)$$

在弱电系统中,若嫌安[培]的单位太大,可以用毫安(mA)及微安(μ A)做单位

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}, \quad 1 \mu \text{ A} = 10^{-6} \text{ A} \quad (1-2-8)$$

在强电系统中,若嫌安[培]的单位太小,可以用千安(kA)及兆安(MA)做单位

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}, \quad 1 \text{ MA} = 10^6 \text{ A} \quad (1-2-9)$$

电流密度的 SI 单位是安[培]/[米]²,也可以用 A/m² 表示。

四、电流的正方向规定

根据传统沿用下来的习惯,电流的正方向规定为正电荷的运动方向。在金属导体中,电流的正方向为负电荷运动的相反方向。因此,在电路图中所有的支路电流,除了要标明相应的表示电流的文字及下标外,还要用箭头来表示它的方向,这样才能完整地、清晰地表述各支路的电流。

五、电流的传播速度与电子的运动速度

关于电流这个物理现象,还需要提及的是电流的传播速度和电子本身的运动速度是两个截然不同的物理概念。

电流是以电磁波的速度即以光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度传播的,千里之外的电源一旦合闸,即刻可以把电送到。然而,千里之外的电子是以它本身的运动速度运动过来的,这好像长长的一列都带有步话机的士兵,司令官通过步话机一声令下“齐步走”,可以说每一个士兵都同时迈开了脚步以光速的速度传播士兵的行进这一现象。但是,每一士兵的步行速度就不是光速了,而是士兵本身的步行速度。金属导体中电子的有序运动的平均速度非常缓慢,像蜗牛那样爬行。此外,电子的具体运动是以电子气的形式进行的,这里谈的是总体电子的平均速度。

1-2-2 电压和电位

电压是电路中的另一个基本电磁物理量,它是描述电场力推动电荷做功的一种度量。

一、电压的定义

单位正电荷在电场力的作用下,由“A”运动到“B”点,电场力所做的功,称为电路中由“A”

点指向“B”点的电压,用 u_{AB} 或 U_{AB} 来表示,其数学定义式为

$$u_{AB} = dw_{AB}/dq \quad (1-2-10)$$

电压实际上是电场强度 $\vec{E}$ 的线积分量,根据电学原理 $dw_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$

$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-2-11)$$

二、电压的正方向规定

电压的正方向,规定为电场力推动正电荷做功时,正电荷的运动方向。在电路中是在其两端(例如端点 A 及 B)上分别标以“+”和“-”的极性,来表明电场力推动正电荷做功时正电荷的运动方向,是从“+”极性端运动到“-”极性端。

三、电压的单位

电压的 SI 单位是伏[特],也可以用 V 来表示。

$$1 \text{ 伏[特]} = 1 \text{ 焦[耳]}/1 \text{ 库[仑]} \quad (1-2-12)$$

此外,电压还有毫伏、微伏、千伏、兆伏等单位,它们分别可用 mV、 μ V、kV、MV 来表示。

$$1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V} \quad (1-2-13)$$

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, \quad 1\text{MV} = 10^6\text{V} \quad (1-2-14)$$

四、电位的概念

在库仑场等无旋场中(无旋场又称为保守场),电场强度 $\vec{E}$ 的闭合路径的线积分为零。即

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1-2-15)$$

对于这样的无旋场才可以引用“电位”的概念。因为,在无旋场中任意两点间的电压与其电场强度 $\vec{E}$ 的积分路径无关,如图 1-1 所示

$$\int_{A \rightarrow B} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{A \rightarrow B} \vec{E} \cdot d\vec{l} = U_{AB} \quad (1-2-16)$$

对于直流电路及频率比较低的工频 50Hz 的电路,它们是无旋场或近似为无旋场。对于集中参数电路,由于忽略了电路的几何尺寸,因此也可以把它们作为无旋场处理。这样的一些电路可以应用电位的概念。然而,对于高频和超高频电路,例如天线的电磁波发射,就不能简单地应用电位的概念了,它要用到动态位的概念。

电位的定义如下:若选取电路中某一点“p”作为参考点,则电路中任一点“A”对参考点“p”的电压,就定义为该点的电位,用 φ_A 来表示,而参考点“p”的电位为零。电位的数学定义式为

$$\varphi_A = \int_A^p \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1-2-17)$$

在电路中可以选取任何一点为参考点,但只能选一个点为参考点,一经选定就不得随意改变,并令所选择的参考点的电位为零。

五、电位与电压的区别和联系

电压是描述电路中两个端点之间的电量。只要谈到电压,就要考察它的两个端点,并且要注意这两个端点的“+”、“-”极性标示。而电位是点函数,电位 φ_A 表明电路中“A”点的电位值,即该点“A”指向参考点“p”的电压值。为了显示这两者的区别,本书中的电位一般用小写的斜体拉丁字母 φ 来表示。

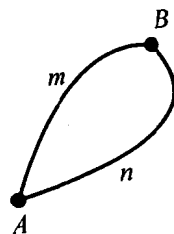


图 1-1
电压与路径无关

由电压的定义,很容易推得电路中任意两点之间的电压就等于这两点的电位之差。

$$\begin{aligned} u_{AB} &= \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_A^p \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_p^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_A^p \vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_B^p \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varphi_A - \varphi_B \end{aligned} \quad (1-2-18)$$

所以电压又称为电位差或称为电位降。

在电路中,随着参考点选择的不同,电路中各点的电位要相应地提高或降低一个数值。但是,电路中任意两点之间的电压值,即两点之间的电位差不会因参考点选择的不同而发生改变。

若已知线性时不变电阻元件的电流 i 及电阻 R ,如图 1-2 所示,则其两端的电位与其电阻 R 及电流 i 的关系如下:

$$\varphi_A - \varphi_B = Ri, \quad \varphi_A = Ri + \varphi_B \quad (1-2-19)$$

电位采用的单位与电压的单位一致,为 V、mV、 μ V 及 kV、MV 等。

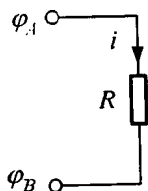


图 1-2 电阻两端的电位与电流

1-2-3 电源和电动势

一、电源装置

电源是一种能逆着电场力的方向,将正电荷从负极板搬向正极板的装置。电源装置将正电荷从负极板搬向正极板的过程中,将要克服电场力而做功,把其它形式的能量转化为电场能量。

例如图 1-3 所示蓄电池就是在化学力的作用下,克服电场力把正电荷从电源的负极板搬向正极板的装置。它将化学能转化为电场能,在蓄电池的两个极板之间建立电场、产生电压。

电源装置克服电场力将正电荷从电源负极板搬向正极板的现象,可以用外来场 $\vec{E}_e$ 来描述。当蓄电池外部未接负载,电池开路其输出电流为零时,在化学力的作用下,蓄电池两块极板上电荷的积累建立库仑电场 $\vec{E}_Q$,最终外来场将与库仑场平衡,使 $\vec{E}_e = \vec{E}_Q$,蓄电池极板上的电荷累积只能达到一定的数值,不会无止境地增加。

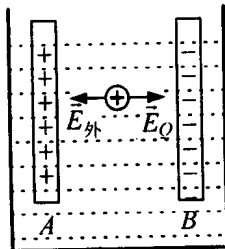


图 1-3 蓄电池

二、电源的电动势 E_S

电源的电动势 E_S 是表述这一装置能克服电场力将单位正电荷从负极板搬向正极板做功的能力的参数,即

$$E_S = \int_B^A \vec{E}_e \cdot d\vec{l} \quad (1-2-20)$$

需要指出的是,电动势 E_S 与电压 u_{AB} 这两个物理量存在着实质性的差别。前者是外来场克服电场力,把单位正电荷从负极板搬向正极板,是非电场力克服电场力做功,把其它形式的能量转化为电场能。而后者是电场力推动单位正电荷从正极板移动到负极板,是电场力在做功,将电场能转化为其它形式的能量。

在电路理论中,这种实质性的区别,表现在电动势 E_S 与电压 u_{AB} 的正方向的规定不同。电动势的正方向规定为从“—”极性端指向“+”极性端,以表明电源装置克服电场力搬动正电荷做功时,正电荷的运动方向,而电压 u_{AB} 的正方向规定为从“+”极性端指向“—”极性端,以表明电场力推动正电荷做功时,正电荷的运动方向。

电动势的单位与电压采用的单位一致,为 V、mV、 μ V 及 kV、MV 等。因为它们都是描述移动单位正电荷做功这样的物理现象的度量,当然可以采用相同的单位。

在电路理论中,除了应正确理解电动势与电压这两个物理量的实质区别外,还应正确理解这两者的联系,不要把它们的区别绝对化。在电路分析中,常常可以把一个电动势看成是一个电压,或者把一个电压看成是一个电动势。当把它看成是一个电压时,就采取电压的正方向规定,从“+”极性端指向“-”极性端;若把它看成是一个电动势时,就采取电动势的正方向规定,从“-”极性端指向“+”极性端。例如一个 36V 的蓄电池,我们既可以把它两端看成 36V 的端电压,也可以把它两端看成是 36V 电动势,只是对两者所采取不同的正方向规定而已。

三、实际电源

实际电源除了具有电动势 E_S 这个参数外,还有内阻 r_S 参数。这是因为当电源接上负载后,电路中就有电流通过,蓄电池正极板上的正电荷在电场力的作用下,将通过外电路移动到负极板。随着正电荷的移动,正、负电荷中和,极板间的库伦电场将降低,这时电源内部的外来场就将源源不断地把正电荷从负极板搬到正极板,在电源内部形成电流。在动态平衡下,电路中的电流维持恒定的数值,电源极板间的电压也维持一个恒定的数值。应该看到,当电源接上负载,电路中出现电流时,电源的端电压 u_{AB} 小于它的电动势 E_S ,即 $u_{AB} < E_S$ 。这是因为当电源内部出现源源不断的电流时,外来场把正电荷从负极板搬到正极板的过程中,除了需要克服库伦电场力做功以外,还需要克服与运动电荷发生碰撞、摩擦等做功而消耗能量。因此,当电源内部有电流通过时,库伦场要小于外来场,即 $E_Q < E_{\text{外}}$,与电源开路、内部电流为零时的情况不同,其端电压 u_{AB} 小于其电动势 E_S 。为了完整地描述一个实际电源,常用一个电动势 E_S 与内电阻 r_S 串联的电路模型来描述它,如图 1-4 所示。图中内电阻 r_S 就是表征电源内部因有电流通过,在搬动电荷时由于出现碰撞、摩擦等而产生能量损耗的一个参数。

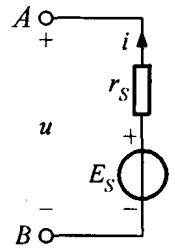


图 1-4 实际电源

实际电源的电压与电流的关系为

$$u_{AB} = E_S - ir_S \quad (1-2-21)$$

从式(1-2-21)可以清楚地看出,当电源开路 $i=0$ 时,实际电源的电动势的数值就等于其开路电压。

1-2-4 磁场、磁通和磁链

磁场是物质存在的特定形式,可以用一段通有电流 I 的载流导体去检验,当载流导体 Δl 处在均匀磁场中时,就要受到力的作用,这个力称为洛伦兹力。

$$\Delta \vec{F} = I \Delta \vec{l} \times \vec{B} \quad (1-2-22)$$

式中 $\vec{B}$ 、 $\Delta \vec{l}$ 、 $\Delta \vec{F}$ 三者的方向符合左手定则。

磁感应强度 $\vec{B}$ 与磁通 Φ 都是描述磁场的物理量,在电路中一般涉及不多,只在分析磁耦合现象时要用到,这里只作一般的介绍。

一、磁感应强度 $\vec{B}$

磁感应强度 $\vec{B}$ (也称为磁通密度)是描述磁场的基本物理量,若

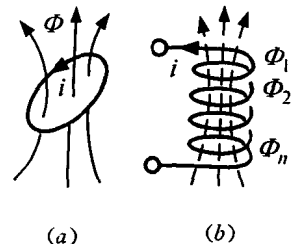


图 1-5 磁通与磁链