



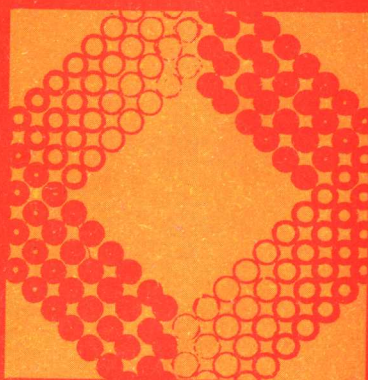
中央广播电视大学教材

电 路 及 磁 路

学习指导

DIAN LU JI CI LU

李立群 谷 良 编



中央广播电视大学出版社

电路及磁路学习指导

李立群 谷良 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

电路及磁路学习指导书/李立群主编. —北京:中央广播电视大学出版社,1994.10

ISBN 7-304-00853-9

I. 电… II. 李… III. ①电路理论—电视大学—教学参考资料②磁路—电视大学—教学参考资料 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 16172 号

电路及磁路学习指导

李立群 谷 良 编

中央广播电视大学出版社出版

社址:北京西城区大木仓 39 号北门 邮编:100032

北京印刷二厂印刷 新华书店北京发行所发行

开本 787×1092 1/16 印张 19.75 千字 490

1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—30100

定价 11.60 元

ISBN7-304-00853-9/TM·20

绪 言

一、电路及磁路课程的任务与内容

电路及磁路是电类各专业重要的技术基础课程,又是电路理论与磁路知识的入门课程。通过本课程的学习,使学生掌握电路的基本概念、基本定律、定理和基本分析计算方法,理解磁路的特点,会计算较简单的磁路问题,并具备进行电工实验的基本技能。为学习后续课程准备必要的电路及磁路知识,并为从事专业技术工作打下基础。本课程对培养学生严肃认真的科学态度,树立理论联系实际的作风,提高分析问题和解决问题的能力等方面都有重要的作用。

课程的教学内容可以分为四部分。第一部分是电阻电路的分析,包括教材《电路及磁路》的第一章至第四章,以电阻电路的分析来介绍电路的基本概念、基本定律、基本定理和电路的基本分析方法,它是全课程的基础。第二部分是正弦交流电路的分析,包括教材的第五章至第八章、第十章和第十一章,介绍正弦量的表示法,正弦交流电路分析的基础,应用相量法分析正弦交流电路,正弦交流的功率,三相电路,含互感电路的分析,频率响应及谐振以及非正弦周期电流电路的分析。第三部分是磁路及铁心线圈,教材的第九章,介绍磁路的基本概念和基本定律,铁磁物质的磁特性,恒定磁通磁路的计算,交变磁通磁路中线圈电压与磁通的关系,磁通与电流的波形,铁心损失以及铁心线圈的电路模型。第四部分是电路中过渡过程的分析,包括教材的第十二章和十三章,介绍电路过渡过程的基本概念和换路定律,RC 和 RL 一阶电路分析的经典法和三要素法,包括直流激励和正弦电源激励电路的过渡过程分析,零输入响应与零状态响应,阶跃函数与阶跃响应,RLC 二阶电路过渡过程的分析,以及拉普拉斯变换及其在电路分析中的应用。

本课程的主教材《电路及磁路》,是根据国家教委“高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求”和中央广播电视大学“电路及磁路课程教学大纲”而编写,由北京理工大学李瀚荪教授主编、中央广播电视大学出版社 1994 年 10 月出版。

二、学习方法的一般指导

本课程的教学工作,是在“掌握概念,强化应用”的思想指导下进行的。所谓“掌握概念”,就是要理解和掌握电路及磁路的基本概念、定律、定义、定理和基本分析方法。要通过“视听”、“笔记”、“阅读”、“记忆”、和“总结”等环节来达到。“视听”就是收看电视讲课。要重视收看电视讲课,因为电视讲课不是简单对教材的重复,而是突出了教学的重点,在理论概念和分析方法上都有更清晰的讲解,能启迪思路,引导理解和掌握教学内容。听电视讲课时,要求听懂和不缺课,并做到集中精力,全神贯注,专心致志。同时要手脑并用,做好听课笔记。“笔记”要简明扼要,条理清楚,重点突出。“阅读”就是及时预习和复习,认真

阅读教材,理解教学内容。对基本概念、定律、定义、定理和基本分析方法,要反复钻研和思考,以求甚解。“记忆”就是对重要的概念、定律、定理的表述和计算公式,在理解的基础上进行记忆,以能熟练运用,“总结”就是对每一章及每一部分的教学内容,通过分析、比较和归纳的方法,将各部分知识贯穿起来,使之系统化、条理化。明确知识之间的联系,找出理论之精髓,方法之要领,真正掌握所学知识,达到学好课程的目的。

所谓“强化应用”,就是强化将所学电路及磁路的基本理论和基本分析方法应用于对电路问题进行分析计算,也就是强化解题训练。读者必须独立完成一定数量的习题,才能巩固和加深理解所学的知识,熟练掌握解题方法和运算技能,提高分析问题和解决问题的能力。强化应用体现在解题的数量和质量两个方面。在数量上,电视讲课时布置的习题是最低题量,必须独立做完,而且应尽可能多做习题,加以强化。在质量上,要认真做习题,要求是:第一,要在课后认真复习,弄懂原理和方法的基础上,再做习题,以达到事半功倍的效果。当然,在做习题过程中遇到问题时,仍需反复钻研教材,以求深化,解决问题。第二,要自己独立完成作业。所谓独立完成作业,就是做习题要经过自己的独立思考,分析研究,亲自动手来做,培养自己的解题能力。当然,在完成作业过程中,对有些问题与同学讨论,或请教教师,也是正常的,必要的。第三,解题时,首先要注意审题,弄清题意和解题条件;其次,要从讲授和教材所述原理出发,明确解题思路和解题方法与步骤,每一步都要有理论的根据。还要注意理论联系实际,注意理论的应用;再次,要注意解题技巧,细心运算,得出正确的结果。作业要书写整洁,条理清楚,培养自己严肃认真的科学作风。

总之,认真贯彻了“掌握概念,强化应用”的指导思想,经过自己的刻苦努力学习,必然会达到教学要求,完成学习任务的。

三、本书的目的与内容

本书是《电路及磁路》的配套教材。编写的目的是,根据“掌握概念,强化应用”的精神,帮助读者明确教学基本要求和教学的重点内容,有的放矢地收视电视讲课,阅读教材,进行学习,加强对电路及磁路基本概念和基本规律的理解,掌握电路及磁路的基本分析方法,提高解题能力和分析问题、解决问题的能力。

本学习指导分章编写,各章包括以下四部分内容:

(一) **基本要求** 根据国家教委“高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求”及中央广播电视大学“电路及磁路课程教学大纲”,提出学习该章必须深刻理解和熟练掌握的重点内容,理解和掌握的主要内容,以及只要求一般了解的次要内容。应该注意的是,只要求了解的内容,并不是可有可无的,也要用心学习。

(二) **学习指导** 为了便于学习,我们首先指明每章的教学内容分为若干部分和主要内容,并就教学内容中的主要问题,作进一步的分析说明,或作概要性的归纳和补充,以加强对这些问题的理解,有助于掌握概念,强化应用。也指出每一章学习的重点和难点内容。

总之,本部分是本书的主要内容,着重于从概念上明确问题。

(三) **解题指导** 解题是强化应用的重要手段,读者必须独立完成一定数量的习题,才能掌握所学电路及磁路的基本理论和基本分析方法。这部分内容是通过典型例题分析来说明解题思路、解题方法和解题中应该注意的问题。每章包含有教材中的部分练习题和习题解答,数

量约占教材中全部练习题和习题的三分之一左右。本书各章选解教材中的练习题和习题的题号以及题中电路图的图号，均与教材相同。因此，在阅读这部分内容时，需参阅《电路及磁路》教材。除此而外，本书中所有电路图的图号均按本书的分章编号。

总之，本部分是本书的重要内容，着重于电路及磁路基本理论与分析计算方法的结合，以提高解题能力和分析问题的能力。

（四）教学媒体与作业 中央广播电视大学是通过多媒体进行远距离教学的高等学校。文字教材是教学内容的主要载体，也是进行教学的基本媒体。采用广播电视媒体进行隔空讲课，是本课程的主要教学方式。本课程电视讲课由李瀚荪教授主讲。共 72 讲，每讲 50 分钟，分两学期授完。上学期共 45 讲，内容是教材的第一章至第九章；下学期共 27 讲，内容是教材的第十章至第十三章。为了配合后续课程教学的需要，在下学期开始，第十二章和十三章先于第十章之前讲授。

本部分所指的教学媒体，是指电视讲课。文中指明每章电视讲课的讲次，介绍每一讲的教学内容。以及每讲布置的课外作业：教材中习题或练习题的题号，以及少量补充习题的题目。这对于同学们的学习来说，无论是课前预习或是课后复习和完成作业，都具有重要作用。

本书第五、六两章由谷良同志编写；李立群同志编写绪言及其余十一章，并负责全书的统稿工作。李瀚荪教授审阅了书稿，并提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

目 录

绪 言	(1)
第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
一、基本要求	(1)
二、学习指导	(1)
三、解题指导	(9)
四、教学媒体与作业	(19)
第二章 电阻电路的等效变换	(22)
一、基本要求	(22)
二、学习指导	(22)
三、解题指导	(25)
四、教学媒体与作业	(35)
第三章 电路的一般分析方法	(37)
一、基本要求	(37)
二、学习指导	(37)
三、解题指导	(41)
四、教学媒体与作业	(51)
第四章 线性电路的几个定理	(53)
一、基本要求	(53)
二、学习指导	(53)
三、解题指导	(55)
四、教学媒体与作业	(67)
第五章 正弦交流电路中的电压、电流相量法	(70)
一、基本要求	(70)
二、学习指导	(71)
三、解题指导	(94)
四、教学媒体与作业	(116)
第六章 正弦交流电路的功率	(122)
一、基本要求	(122)
二、学习指导	(122)
三、解题指导	(130)
四、教学媒体与作业	(139)
第七章 三相电路	(142)
一、基本要求	(142)

二、学习指导.....	(142)
三、解题指导.....	(148)
四、教学媒体与作业.....	(155)
第八章 含互感电路的分析	(159)
一、基本要求.....	(159)
二、学习指导.....	(159)
三、解题指导.....	(169)
四、教学媒体与作业.....	(179)
第九章 磁路与铁心线圈	(183)
一、基本要求.....	(183)
二、学习指导.....	(183)
三、解题指导.....	(196)
四、教学媒体与作业.....	(204)
第十章 正弦交流电路的频率响应及谐振	(209)
一、基本要求.....	(209)
二、学习指导.....	(209)
三、解题指导.....	(213)
四、教学媒体与作业.....	(220)
第十一章 非正弦交流电路	(226)
一、基本要求.....	(226)
二、学习指导.....	(226)
三、解题指导.....	(236)
四、教学媒体与作业.....	(243)
第十二章 电路中的过渡过程	(247)
一、基本要求.....	(247)
二、学习指导.....	(247)
三、解题指导.....	(259)
四、教学媒体与作业.....	(279)
第十三章 拉普拉斯变换在电路分析中的应用	(289)
一、基本要求.....	(289)
二、学习指导.....	(289)
三、解题指导.....	(295)
四、教学媒体与作业.....	(305)

第一章 电路的基本概念和基本定律

一、基本要求

1. 理解电路模型的概念。包括实际电路元(部)件用理想化模型来表征的概念、实际电路用模型表征的概念,以及电路集总化的假设。一般了解电路的组成及其功能。
2. 深刻理解和牢固掌握电压、电流及其参考方向的概念。理解和掌握电位和电动势的概念。
3. 理解电功率和电能的概念及其计算方法。会正确判定电路中元件或某部分电路是产生功率抑或吸收功率。
4. 深刻理解和熟练掌握基尔霍夫电流定律(KCL)和电压定律(KVL),能正确列出节点的电流方程和回路的电压方程,以及它们的推广应用。
5. 深刻理解和牢固掌握电阻元件、电压源和电流源的特性及其端钮的电压电流关系,能正确写出它们的表达式。明确线性元件和非线性元件的概念。
6. 明确和掌握受控源的性质及它们的输出特性表达式。
7. 熟练掌握单回路电路的分析方法和分压计算。熟练掌握单节偶电路的分析方法和分流计算。
8. 掌握电路中电位的计算。

二、学习指导

本章是全课程的基础,教学内容可分如下三部分:

1. 电路的基本概念。包括电路模型的概念、电路中的基本物理量和电压、电流参考方向的概念;
2. 电路的基本规律——基尔霍夫定律和几种电路元件的伏安关系;
3. 两类基本电路的分析计算方法。即单回路电路和单节偶电路的分析计算。

着重讨论电路模型的概念,电路中的物理量,电压和电流的参考方向,基尔霍夫电流定律和电压定律,电阻元件、电压源和电流源的伏安关系,以及两类基本电路的分析方法和直流电路中电位的计算。

现就本章教学内容中的几个问题分述如下。

(一) 关于电路模型的概念

电路及磁路课程是研究电路及磁路基本规律及其分析计算的学科。在开始学习课程的时候,首先必须明确课程研究的对象是什么。电路课程研究的不是实际电路,而是电路模型。电路模型是重要的基本概念,应从如下几方面来理解。

1. 实际电路元件用理想化模型来表征的概念

理想化电路元件,是实际电路元件的科学抽象,即理想化模型。每一种理想元件,(1)具

有确定的电磁性质。如三种基本理想电路元件：电阻元件是实际电阻器的理想化模型，它只具有将电能转换为热能的性质；电感元件是实际电感器的理想化模型，它只具有储存磁场能量的性质；电容元件是实际电容器的理想化模型，它只具有储存电场能量的性质。又如有两种理想化电源元件：电压源是实际电源的一种理想化模型，它只具有提供恒定电压或给定函数电压的性质；电流源是实际电源的另一种理想化模型，它只具有输出恒定电流或给定函数电流的性质。(2) 具有精确的数学定义和数学表达式。这就奠定了对电路进行分析计算的基础。任何一个实际的电路元(部)件，都可以用一个或多个基本电路元件来模拟，表征它的主要电磁性质。

2. 实际电路用模型表征的概念

电路模型是实际电路的科学抽象，即理想化模型，它是由理想化电路元件作为基本构成单元而组成，表征实际电路的主要电磁特性。

3. 电路模型的结构特征及功能

电路模型在结构上有支路(每一个两端电路元件就是一支路)、节点(两条或两条以上支路的交汇点)、回路(电路中任一闭合的路径)及网孔(内部没有交叉支路的回路)。

电路的功用是能量传递和信息处理。

4. 电路模型是电路分析的基础

由于每一种电路元件都具有精确的数学定义和数学表达式。所以，由若干电路元件所组成的电路模型，就可以用数学的方法对整个电路进行分析计算，而且又可以将种类繁多的实际电路抽象化、一般化，进而便于进行分析研究。模型的理论，是一种科学理论和方法。因此，电路模型成为电路及磁路这门学科理论的基础。

(二) 关于电路集总化假设

电路元件有集总参数电路元件和分布参数电路元件之分；电路模型也有集总参数模型(简称集总电路)与分布参数模型之分。这也是我们学习本课程首先需明确的基本概念之一。应从如下两方面来理解。

1. 集总化的假设

如果实际电路元(部)件的外形尺寸远比通过它的电磁波信号的波长小得多，可以忽略不计，这种元(部)件称为集总参数元(部)件。用来模拟集中参数元件的理想元件，称为集总元件。由集总元件构成的电路模型，称为集总模型。任何时刻流经集总元件的电流和元件两端的电压都有完全确定值，这时电流和电压只是时间的函数。由此得出重要的电路集总化假设为：如果电路的空间尺寸远小于该电路最高工作频率的波长，这种电路称为集总电路，否则就是分布参数电路。

2. 物理概念的理解

集总意味着电路元(部)件中的电场与磁场分开，电场只与电容元件相联系，磁场只与电感元件相联系。两种场之间不存在相互作用，否则电场与磁场相互作用将产生电磁波，电磁波便要辐射，将一部分能量辐射而损失掉。因此，只有在辐射能量可以忽略不计的情况下，才能采用集总概念。例如，我国电力系统交流电的频率为 50Hz，对应的波长为 6000km，这对实验室设备而言，其空间尺寸远小于电磁波的波长，采用集总化概念是完全可以的。但是，对于电压为 220kV 的高压输电线路而言，线路的长度与交流电的波长相比，不能忽略不计，就必须考虑电场与磁场沿线路的分布现象，不能采用集总参数，而要采用分布参数来表征了。

本课程的教学内容是讨论集总电路，所介绍的电路定律和定理都是在集总化假设条件下使用的。

(三) 关于电路中的基本物理量

描述电路中电磁现象和过程的基本物理量有：电流、电荷、电压和磁通。复合基本物理量有：电功率和电能。

电路中的物理量，从掌握概念、强化应用的角度而言，最主要的是电流和电压及它们的参考方向的概念。也还要明确电位、电动势和电功率的概念。

1. 电流及其参考方向

关于电流的概念，应明确的是：(1) 电流是电荷在电场力作用下有规则的运动。(2) 电流的大小即电流强度（简称电流）定义为：单位时间内通过导体横截面的电荷量。也就是电荷 q 对时间 t 的变化率，即 $i = \frac{dq}{dt}$ ，单位是安培（A）。 i 表示任意的电流。对于直流电流，一般用 I 表示，出可以用 i 表示。(3) 习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的真实方向。(4) 在电路分析时，电路中电流的真实方向未知，特别是复杂电路就更难判定电流的真实方向了。为了解决这一困难，可以在电路分析前，任意假定电流的方向，在电路模型图中用箭头符号标示，称为参考方向。当电路中电流的参考方向假定后，电流就是一个代数量，可能是正值或是负值。若分析计算的结果，电流为正值，则电流的真实方向与参考方向一致；若为负值，则表示电流的真实方向与参考方向相反。

2. 电压及其参考方向

关于电压的概念，应明确的是：(1) 电荷在电场力作用下有规则的运动而形成电流，在这过程中电场力推动电荷运动而做功，作功的能力，用“电压”这个物理量来表示。(2) 电压的大小为电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。即 ab 两点之间的电压为 $u_{ab} = dw/dq$ ，式中 w 就是电场力推动正电荷 q 从 a 点到 b 点所做的功。电压的单位是伏特（V）。 u 表示任意的电压。对于直流电压一般用 U 表示，也可以用 u 表示。(3) 如果电场力做功为正值，单位正电荷失去能量， u_{ab} 称为电压降；如果电场力做功为负值，单位正电荷获得能量， u_{ab} 称为电压升。(4) 单位正电荷在电路中某一点所具有的电位能，称为该点的电位，等于单位正电荷从该点经过任意途径移到无穷远点（即参考点）时电场力所做的功，单位是伏特（V）。电位用字母 V 带下标表示，下标表示电位所在点。如 a 点的电位用 V_a 表示。电路中任意两点 ab 之间的电压就是该两点的电位差，即 $u_{ab} = V_a - V_b$ 。(5) 习惯上规定，电压的真实方向是由高电位点指向低电位点，即电压降的方向。在电路分析中，电压的真实方向为未知。为了分析计算的方便，像电流一样，先任意假定参考方向，在电路图中标出。标示的方法可以“+”号表示高电位点，“-”号表示低电位点；或用箭头符号表示，箭矢方向是由高电位点指向低电位点。在表达式用双下标表示时，如 u_{ab} ，下标 a 表示高电位点， b 表示低电位点。电路中电压的参考方向假定后，电压就是一个代数量，可能为正值，也可能为负值。若分析计算的结果，电压为正值，则表示电压的真实方向与参考方向一致；若为负值，则表示电压的真实方向与参考方向相反。

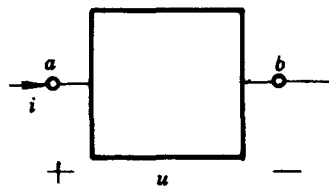


图 1-1 关联参考方向

3. 电压电流的关联参考方向与功率正负的概念

所谓电压与电流的关联参考方向,如图 1-1 所示,就 ab 电路而言,电流 i 的参考方向是从 a 端流入电路,从 b 端流出电路;电压 u 的参考方向是 a 端为高电位, b 端为低电位,即电压降方向。关联参考方向又称为一致参考方向。

在关联参考方向下, ab 电路的功率表达式为

$$p=ui$$

若分析计算的结果, u, i 均为正值,或均为负值,则功率 $p>0$ 为正值,表示 ab 电路吸收功率;若 u, i 互为异号,则功率 $p<0$ 为负值,表示 ab 电路产生功率。

如果 ab 电路的电压和电流是非关联参考方向,如图 1-2 所示,则其功率表达式为

$$p=-ui$$

若分析计算的结果, u, i 均为正值,或均为负值,则 ab 电路的功率 $p<0$ 为负值。表示 ab 电路产生功率;若 u, i 互为异号,则功率 $p>0$ 为正值。表示 ab 电路吸收功率。这就是功率正负的概念。

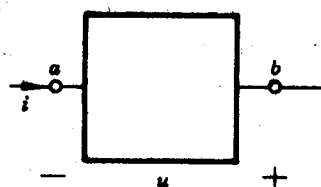


图 1-2 非关联参考方向

由于电路的分析计算,离不开电压和电流的参考方向。因此,电压电流参考方向是电路理论中十分重要的概念,必须深刻理解和熟练掌握。

4. 关于电动势的概念

关于电动势的概念,应明确如下几点:

(1) 电动势是表示电源性质的物理量。电源是把其它形态的能量转换为电能的装置。每一种电源在任一时刻都有正极和负极。电源内部存在着某种非电场力,它能克服电场力而做功,迫使正电荷从低电位点的负极经电源内部移动到高电位点的正极,在这过程中把其它形态的能量转换为电能。为了表征电源内部非电场力对正电荷做功的能力,或者说,为了表示其它形态的能量转换为电能的能力,引入了电动势的概念。

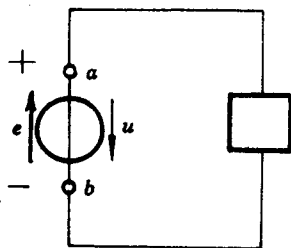


图 1-3 用电动势和电压表示电源两端的电位差

(2) 电源的电动势等于其内部非电场力把单位正电荷从负极经内部移动到正极时所做的功。单位与电压相同。电动势的大小取决于电源的本身,与外电路无关。任意的电动势用 e 表示。对于大小和方向不随时间变化的直流电动势,一般用 E 表示,也可以用 e 表示。

(3) 习惯上规定电动势的真实方向,是由低电位点负极指向高电位点正极,即电位升的方向。这正好与电压的真实方向相反。

(4) 电动势与电压是两个不同的概念。前者是非电场力把单位正电荷从低电位点负极移动到高电位点正极所做的功;而后者是电场力把单位正电荷从高电位点移到低电位点所做的功。但是,它们都可以用来表示电源正、负极之间的电位差。在闭合电路中,从电源对外

电路的表现这一客观效果来看,如图 1-3 所示,既可以用正、负极 ab 之间的电动势 e 来表示,也可以用其间的电压 u 来表示。应注意的是,两者的参考方向正好相反。

(四) 关于电路分析的基本依据

电路分析,是在给定电路的结构和元件参数的条件下,求解电路中的电流和电压,进而计算电功率和电能。电路中的电流和电压遵循的规律是什么,也就是电路分析的基本依据是什么,这是十分重要的基本概念。

电路中电流和电压所遵循的规律,即电路分析的基本依据,包括两个方面。一是电路整体结构上,同一节点各支路电流之间和回路中各支路电压之间所必须遵循的规律,这就是基尔霍夫电流定律和电压定律,称为结构约束或拓扑约束。结构约束表现为电路中节点的电流方程和回路的电压方程,称为结构约束方程。二是电路中各个电路元件,通过它的电流与其两端电压之间所遵循的规律,这就是由电路元件本身性质所确定元件端钮的电压电流关系(RVA),称为元件约束。元件约束表现为各种元件电压电流关系的数学方程,称为元件约束方程。电路中任一支路的电流和电压,都必须同时满足这两类约束方程。

(五) 关于基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律用来确定电路中交汇于同一节点各支路电流之间的关系。该定律指出:对于任何一个集总电路中的任一节点,在任一瞬间通过该节点所有支路电流的代数和等于零。其一般的数学表达式,即节点电流方程为

$$\sum i = 0$$

在理解和应用这一定律时,应明确和注意如下几点:

(1) 所谓通过节点各支路电流的代数和等于零,就是任意假定各支路电流的参考方向后,每一电流都是一代数量,在列节点 KCL 方程时,可以规定从支路流入节点的电流为正,流出节点的电流为负(也可以作相反的规定),于是,流入节点的电流必然等于流出节点的电流,即通过节点各支路电流的代数和等于零。这是电荷守恒原理必然的结果。否则,就意味着节点上有电荷堆积或消失,那就违背了电荷守恒的原理了。

(2) 基尔霍夫电流定律与电路中各元件的性质无关。这是因为 KCL 是电荷守恒原理,也就是电流连续性原理的结果,故与元件性质无关。

(3) 基尔霍夫电流定律仅适用于集总电路,它是集总电路分析的一个基本定律。

(4) 基尔霍夫电流定律,不仅适用于电路中的任何一个节点,而且也可以推广应用于包围部分电路的任何一个假想的封闭面,该封闭面称为广义节点。故 KCL 的推广应用是:任一瞬间通过集总电路的广义节点,即封闭面电流的代数和等于零。

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律用来确定电路中任何一个闭合回路各支路电压之间的关系。该定律指出:对于任何一个集总电路的任一闭合回路,在任一瞬间沿该闭合回路所有支路电压的代数和等于零。其一般数学表达式,即回路的 KVL 方程为

$$\sum u = 0$$

在理解和应用这一定律时,应明确和注意如下几点:

(1) 在电路分析时,各支路电压都必须选定参考方向。因此,每一个支路电压都是一代数量。在列回路 KVL 方程时,还要任意选定列方程的绕行方向。凡支路电压的参考方向与绕行方向一致时,KVL 方程中该支路电压为正值;反之,则为负值。所谓回路中各支路电压的代数和等于零,就是回路按上述各支路电压参考方向与绕行方向确定的各支路电压的代数量之和等于零。

(2) 基尔霍夫电压定律与回路中各元件的性质无关。这是因为,KVL 是能量守恒的反映,也就是电位单值性原理的表现。我们知道,电压的大小,是量度在电场中使电荷移动的电场力做功的能力。电场力推动单位正电荷从某一点出发,沿任一闭合回路绕行一周所做的功等于零,即沿闭合回路绕行中,单位正电荷有时获得电位能(即电压升,如从电压源的负极到正极);有时失去电位能(如沿电流方向经过电阻元件产生的电压降)。绕行一周后单位正电荷仍回到原来的出发点,应具有原来的电位能,这就是电位单值性的表现。因此,在绕行过程中单位正电荷获得的电位能与失去的电位能必然相等,故 KVL 与回路中元件性质无关。

(3) 基尔霍夫电压定律仅适用于集总电路,是集总电路分析的一个基本定律。

(4) 基尔霍夫电压定律不仅适用于电路中的任一个闭合回路,而且也可以推广应用于电路中任一假想闭合回路。KVL 的推广应用是:任一瞬间沿假想闭合回路各支路电压的代数和等于零。

总之,基尔霍夫定律符合电荷守恒和能量守恒基本原理。因为电荷激发电场,电荷运动形成电流;电流激发磁场,有了磁场才能有磁通;一个系统的电荷分布状态决定了该系统的电压分布状态。所以,电荷的存在是一切电磁现象的本质所在,电荷运动变化是决定其它一切电磁现象运动变化的根本,所有电荷运动都必须符合电荷守恒的原理。能量是电路中电流、电压、电荷和磁通运动变化的源泉。电路中的能量是由电源提供的。电路中所发生的任何电磁过程,本质上都是能量转换的过程。一切能量转换过程都必须符合能量守恒的原理。

(六) 关于线性电阻元件与欧姆定律

1. 线性电阻元件与非线性电阻元件的定义

如果一个二端元件,通过它的电流与其两端电压的关系,即伏安关系(VAR),在 u, i 平面上是通过坐标原点的一条直线,直线的斜率就是元件的参数电阻 R ,单位是欧姆(Ω),这种元件称为线性电阻元件。如果线性电阻元件的参数 R 是不随时间变化的常数,则称为线性、非时变电阻元件。如果电阻元件的 VAR,在 u, i 平面上是通过坐标原点位于 I, III 象限的一条直线,直线的斜率 R 为正值常数,则称为线性正电阻元件。本课程所说的电阻元件一般就是指线性、非时变正电阻元件。

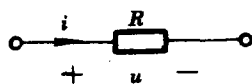


图 1-4 线性电阻元件

如果二端元件的 VAR,在 u, i 平面上是不通过坐标原点的曲线,则这种元件称为非线性电阻元件。

2. 电阻元件的特性

电阻元件的特性是呈现对电荷运动的阻力,具有阻碍电流流动的性质。一个电阻元件的电阻 R 具体地表明了这一种性质。电阻元件的特性也可以用另一种参数,电导 G 来表示,电导是电阻 R 的倒数,即

$$G = \frac{1}{R}$$

电导 G 表示了电阻元件传导电流的能力, 单位是西门子(S)。

3. 线性电阻元件与欧姆定律

(1) 线性电阻元件, 由于其参数 R 是一个常数, 元件两端的电压与通过它的电流成正比, 称为欧姆定律。在如图 1-4 所示关联参考方向下, 其数学表达式为

$$u = Ri$$

或

$$i = Gu$$

这是电阻元件 VAR 的数学方程, 是电路分析的基本依据之一。

(2) 欧姆定律是线性电路的一个基本定律。线性电阻电路就是由线性电阻元件和独立电源组成的电路。欧姆定律不仅是对一个电阻元件的规律, 而且在线性电阻电路中, 对于一个由多个电阻元件串联的支路或一段电路, 支路及一段电路中不含电源元件, 则通过该支路或一段电路的电流与其两端的电压关系, 都符合欧姆定律的规律。

4. 线性电阻元件消耗的功率和电能

(1) 电阻元件对电流呈现阻力, 就要消耗电功率, 转换为热能。在关联参考方向下, 电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}$$

在直流情况下, 电阻元件消耗的功率为

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

(2) 电阻元件 R 在从 t_0 到 t 这段时间内消耗的电能

$$W = \int_{t_0}^t P d\xi = \int_{t_0}^t Ri^2 d\xi = \int_{t_0}^t \frac{u^2}{R} d\xi$$

在直流情况下, 则为

$$W = P(t - t_0) = I^2 R(t - t_0) = \frac{U^2}{R}(t - t_0)$$

上两式称为焦耳定律。

(七) 关于电压源和电流源的性质

电源是电路中能量的来源, 在电路中起激励作用, 产生电流和电压。有两种理想电源元件, 即电压源和电流源, 它们都是独立电源。

1. 电压源

电压源是一种理想化的电源元件, 它具有两个基本性质: (1) 元件两端的电压总是保持一恒定值或给定的某一函数值不变, 与通过它的电流无关, 不受外电路的影响; (2) 元件通过的电流由与之相联接的外电路来决定, 与电压源本身无关。电流可以从不同方向通过电压源, 因此, 电压源既可以向外电路提供电能, 也可以从外电路接收电能成为负载, 视由外电路决定的电流方向而定。由于电压源的端电压总是保持给定值不变, 这类电源又称为恒压源。

由电压源上述性质所决定元件的 VAR, 是电路分析的基本依据之一。从而亦可知, 电压

源是非线性元件。

2. 电流源

电流源是另一种理想化电源元件，它也具有两种基本性质：(1) 元件输出的电流总是保持一恒定值或给定的某一函数值不变，与两端的电压无关，不受外电路的影响；(2) 元件两端的电压，由与之相联接的外电路来决定，而与电流源本身无关。两端电压的极性，即方向可以不同，由外电路所确定。因此，电流源既可以向外电路提供电能，也可以从外电路接收电能成为负载，视其端电压的极性而定。由于电流源的输出电流总是保持给定值不变，故这类电源又称为恒流源。

由电流源上述性质所决定元件的 VAR，是电路分析的基本依据之一。从而亦可知，电流源是非线性元件。

(八) 关于受控源及其性质

1. 受控源的输出特性方程

受控源是一种非独立电源，这类电源输出端钮的电压或电流，受电路中某一元件或某一支路的电流或电压所决定。在电路图中用菱形符号表示。有四种受控源，它们的输出特性方程分别为

电压控制电压源 (VCVS): $u_2 = \mu u_1$

电流控制电压源 (CCVS): $u_2 = \gamma i_1$

电压控制电流源 (VCCS): $i_2 = g u_1$

电流控制电流源 (CCCS): $i_2 = \alpha i_1$

式中: u_1, i_1 分别为控制量; u_2, i_2 分别为输出量。

受控源上述输出特性方程，就是它们的 VAR，是电路分析的基本依据。

2. 受控源是理想的电路元件

受控源在电路理论中，是一种理想化的电路元件，它主要作为电子器件的模型，为电子电路的分析提供基础。此外，还有发电机、变压器等电磁耦合元件，也可以用受控源的电路来模拟。

3. 关于受控源的性质

受控源具有两种性质：

(1) 电源性质 受控源是非独立电源，受控于电路中某一支路的电压或电流，只要控制量存在，则受控电源就存在，它具有与独立电源相同的性质和作用。

(2) 电阻性质 由于表征受控源输出特性的数学方程，是以电压或电流为变量的线性代数方程。所以受控源可以看作是一种电阻元件。这一点从 VCCS 和 CCVS 两类受控源的输出特性方程可以看出。CCVS 方程中的参数 γ 就是电阻，VCCS 方程中参数 g 的倒数也是电阻，受控源相当一个电阻，再从 CCCS 和 VCVS 两类受控源的输出特性方程可以看出，当输入端控制量为零时，输出端受控量也随之为零，这只有电阻元件才有这种性质。但是，受控源本身并非是一种金属电阻，而是从它的输入与输出关系表现具有电阻元件的性质，这一点应予注意和理解。

(九) 关于两类基本电路的分析计算

1. 单回路电阻电路的分析计算

已知单一闭合回路中各串联元件的参数，求电路中的电流和各电阻元件的电压。回路中

的电流可以运用 KVL 列出回路的电压方程及电阻元件的 VAR 计算得出,或直接运用全电路的欧姆定律计算得出;求出回路电流后,各电阻元件两端的电压,可以利用元件的 VAR 计算得出,或者直接运用分压公式计算得出。分析计算中,应注意正确运用电压和电流的参考方向。

2. 单节偶电阻电路的分析计算

对于一对节点各支路元件并联的单节偶电路,已知各元件的参数,电源元件是电流源,求节偶电压和各电阻支路的电流。节偶电压可以运用 KCL 列出节点电流方程和电阻元件的 VAR 计算得出,或者直接运用弥尔曼定理公式计算得出;求出节偶电压后,各电阻支路的电流,可以利用元件的 VAR 计算得出,或者直接运用分流公式计算得出。特别是两个电阻元件并联的分流公式,是经常运用的,应予熟记。在分析计算中,同样应注意电压和电流参考方向的正确运用。

单回路和单节偶电路,是最简单最基本的电路,它们的分析计算方法,是电路分析中最基本的分析方法,是较复杂电路分析的基础。因此,熟练掌握这两类基本电路的分析计算方法具有重要意义。

本章学习的重点内容是:电压与电流参考方向的概念,基尔霍夫电流定律和电压定律,电阻元件、电压源和电流源的伏安关系,以及单回路和单节偶两类电路的分析方法。

三、解 题 指 导

(一) 例题分析

〔例 1-1〕 单回路电路的分析计算。如图 1-5 所示电路,求电流 i 和电压 u_1 , u_2 。

解:〔解题思路〕 本题是一含受控电压源的单回路电路,已知电压源和电阻元件的参数,回路电流和各电阻元件的电压参考方向都已在图中标出,求电流 i 和电压 u_1 与 u_2 。首先要求出回路电流 i ,然后再求电压 u_1 和 u_2 。在解题中受控电压源与独立电压源同样看待。

〔解题方法〕 (1) 计算回路电流 i

方法之一 列回路 KVL 方程。选定顺时针方向为绕行方向,计入电阻元件的 VAR,则回路的 KVL 方程为

$$\begin{aligned} 6i + 2i + 2i &= 12 \\ 10i &= 12 \\ \therefore i &= \frac{12}{10} = 1.2 \text{ A} \end{aligned}$$

方法之二 直接运用全电路欧姆定律计算电流 i ,即

$$i = \frac{12 - 2i}{6 + 2} = \frac{3}{2} - \frac{1}{4}i$$

移项后得出

$$5i = 6$$

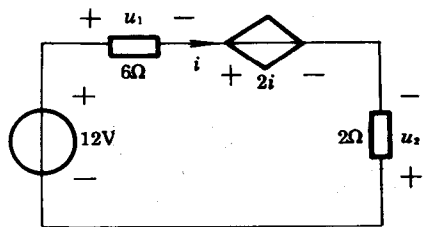


图 1-5 例 1-1 电路图