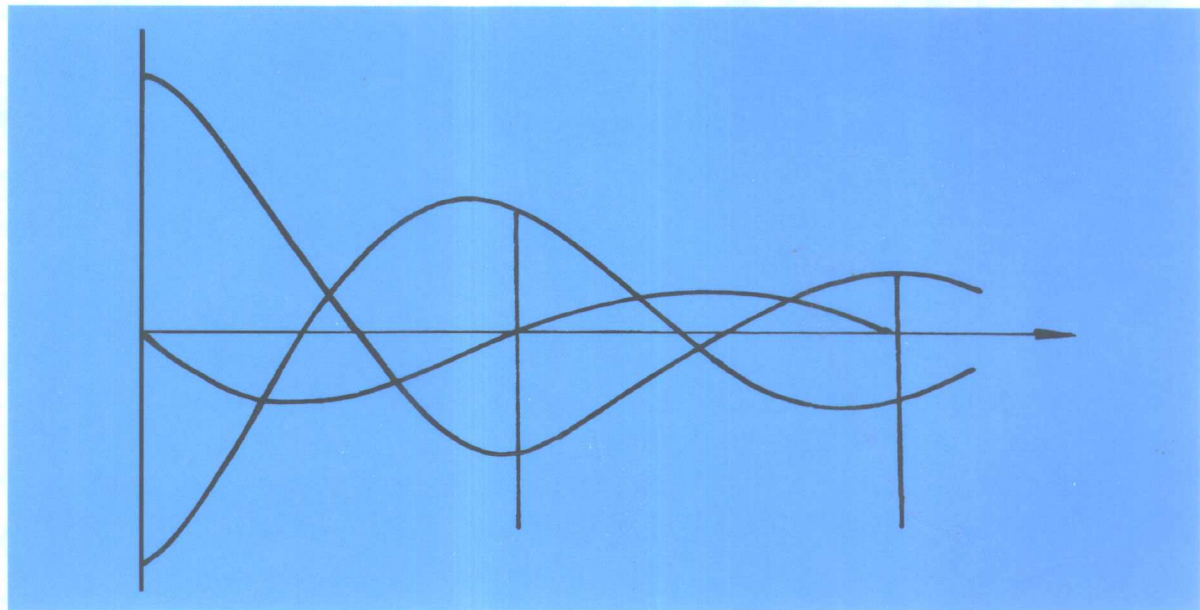


J I B E N D I A N L U L I L U N

全国普通高等院校电类专业使用教材

(第三版)

基本电路理论



王 蔼 主编 苏中义 陈洪亮 李 丹 改编

上海科学技术文献出版社

450

71113
S716

全国普通高等院校电类专业使用教材

基本电路理论

(第三版)

王 嵩 主 编

苏中义 陈洪亮

李 丹 改 编

上海科学技术文献出版社

内 容 简 介

本书共有 12 章,分别阐述了集中参数电路和基尔霍夫定律、电路元件、线性定常电阻性网络的一般分析法、电阻性网络的一般分析与网络定理、一阶电路、二阶电路、正弦稳态分析、三相电路、非正弦周期信号作用下电路的稳态分析、运算法及其应用、双口网络、状态变量法等。书中各章列举了相应的实例分析并都附有一定数量的习题,对掌握各章节的内容有很强的针对性。

本书可作为普通高校电类专业电路课程的教材,也可供夜大学、职工大学等成人高校电类专业的学生、自学者和有关科技人员参考。本书也可作为电类专业工程硕士考前辅导用书。

图书在版编目(CIP)数据

基本电路理论 / 苏中义编. — 3 版. — 上海: 上海科学技术文献出版社, 2002. 10
ISBN 7-5439-1980-X

I. 基… II. 苏… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 038802 号

责任编辑: 方金善

封面设计: 徐 利

全国普通高等院校电类专业使用教材

基本电路理论

(第三版)

王 嵩 主编 苏中义 陈洪亮 李 丹 改编

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路 2 号 邮政编码 200031)

全国新华书店经销

江苏昆山亭林印刷总厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 30 字数 748 000

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—3 100

ISBN 7-5439-1980-X/T·693

定价: 55.00 元

前 言

(第三版)

1986年王蔼教授主编的《基本电路理论》出版了。该书汲取了当时国外许多电路理论的新思想、与传统的电路理论相融合,给人以耳目一新的感觉。经上海交通大学与其他许多学校电类专业多年的使用,获得了师生一致的好评。本书对提高我国高等工科院校电路课程的教学水平和教学效果起过积极的促进作用。

1993年王蔼教授主持第一次的修订工作,使本书的内容更趋合理。世纪之交,对“电路”教学提出了更高要求,为适应形势的变化,我们在院系领导的支持下,决定对《基本电路理论》教材进行第二次修订,鉴于2002年年底出版修订后的第三版教材。

第三版与修订版相比,在教学内容与体系结构上主要做了以下几方面的调整:

(1) 将修订版的第四章、第五章合并为一章,即电阻性网络的一般分析与网络定理;

(2) 将二阶电路中“对任意输入的零状态响应”移到一阶电路章中为最后一节;

(3) 将修订版的拉普拉斯变换及网络函数合并为一章,即运算法及其应用;

(4) 由于学时所限,将修订版中非线性电阻性电路及非线性动态电路部分删去。

本书共分12章,即集中参数电路和基尔霍夫定律,电路元件,线性定常电阻性网络的一般分析法,电阻性网络的一般分析与网络定理,一阶电路,二阶电路,正弦稳态分析,三相电路,非正弦周期信号作用下电路的稳态分析,运算法及其应用,双口网络,状态变量法。

《基本电路理论》是电类专业的一门重要的专业基础课,是许多专业选优、考研(包括工程硕士)的必选课程。

本书第1~4章由陈洪亮执笔;第5,6,10,11,12章由苏中义执笔;第7,8,9章由李丹执笔;全书由苏中义统稿。

本书的编写得到了王蔼教授的关注、指导,得到了院、系领导的支持,在此表示由衷的感谢。上海科学技术文献出版社的领导和编辑对本书的出版给予充分的支持,深表谢意。

由于修订的时间较仓促,加上水平所限,缺点及不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者
于上海交通大学
2002.7

目 录

第一章 集中参数电路和基尔霍夫定律

1.1 集中参数电路	1	之间的关系	13
1.2 基尔霍夫定律	5	1.4 关联矩阵和 KCL, KVL 的矩阵形式	14
1.2.1 基尔霍夫电流定律	6	1.4.1 关联矩阵和降阶关联矩阵	14
1.2.2 基尔霍夫电压定律	7	1.4.2 KCL 的矩阵形式	15
1.3 从网络到图	8	1.4.3 KVL 的矩阵形式	17
1.3.1 图	8	1.5 特勒根定理	17
1.3.2 子图	11	习题	19
1.3.3 支路数、节点数和独立回路数			

第二章 电路元件

2.1 二端电阻器	22	2.5.1 电阻器吸收的瞬时功率和能量	42
2.1.1 线性电阻器	23	2.5.2 电容器储存的能量	44
2.1.2 非线性电阻器	25	2.5.3 电感器储存的能量	46
2.2 独立电源	29	2.6 多端元件	46
2.2.1 电压源和电流源	29	2.6.1 受控电源	47
2.2.2 三种基本的波形	30	2.6.2 运算放大器	49
2.3 二端电容器	35	2.6.3 负转换器	51
2.3.1 线性电容器	36	2.6.4 回转器	53
2.3.2 非线性电容器	38	2.6.5 耦合电感器	54
2.4 二端电感器	39	2.6.6 理想变压器	57
2.4.1 线性电感器	39	习题	59
2.4.2 非线性电感器	41		
2.5 二端元件吸收的功率和能量	42		

第三章 线性定常电阻性网络的一般分析法

3.1 网络的分类及定义	65	3.4 线性定常电阻器的串、并联等连接的等效简化	72
3.2 线性定常电阻性网络的直接分析法——支路电流法和支路电压法	66	3.5 含独立电源网络的等效变换	75
3.3 等效网络	70	3.5.1 独立电源的串联	75
3.3.1 等效和等效关系	70	3.5.2 独立电源的并联	77
3.3.2 等效网络	70	3.5.3 独立电源的分裂	79

3.5.4 含源支路的等效变换	79	3.7 具有对称性质的网络	86
3.5.5 电源转移	81	3.8 含有受控电源的网络化简	91
3.6 星形连接(T型网络)与三角形连接 (Π 型网络)的等效变换	83	习题	93

第四章 电阻性网络的一般分析与网络定理

4.1 节点分析法	100	4.7.1 替代定理	127
4.2 改进的节点分析法	104	4.7.2 替代定理的应用	128
4.3 网孔分析法	106	4.8 迭加定理	129
4.4 对偶性	108	4.8.1 迭加定理	129
4.5 回路分析法	112	4.8.2 迭加定理的应用	129
4.5.1 用于回路分析的基尔霍夫定律 的矩阵形式	112	4.9 戴维宁定理和诺顿定理	132
4.5.2 电阻性网络的回路方程	116	4.9.1 戴维宁定理和诺顿定理	132
4.6 割集分析法	120	4.9.2 定理应用的实例	134
4.6.1 用于割集分析的基尔霍夫定律 的矩阵形式	120	4.10 互易定理	139
4.6.2 电阻性网络的割集方程	123	4.10.1 互易定理	139
4.7 替代定理	127	4.10.2 互易定理的应用	141
		习题	143

第五章 一阶电路

5.1 线性定常一阶电路的零输入响应 ..	153	零状态响应	166
5.1.1 电阻器-电容器(RC)电路的零 输入响应	154	5.2.3 零状态响应与电路输入的 关系	167
5.1.2 电阻器-电感器(RL)电路的零 输入响应	157	5.3 线性定常一阶电路的全响应	169
5.1.3 零输入响应与初始状态的 关系	159	5.4 戴维宁定理在一阶电路中的 应用	175
5.2 线性定常一阶电路的零状态响应 ..	160	5.5 线性定常电路的定常特性	179
5.2.1 具有恒定电压输入的 RC 和 RL 电路的零状态响应	160	5.6 阶跃响应	181
5.2.2 具有正弦输入的 RL 电路的 零状态响应	166	5.7 冲激响应	184
		5.8 对任意输入的零状态响应	188
		习题	192

第六章 二阶电路

6.1 线性定常 RLC 串联电路的零输入 响应	201	阶跃响应	214
6.2 线性定常 RLC 串联电路的零状态 响应	213	6.2.2 线性定常 RLC 串联电路的 冲激响应	217
6.2.1 线性定常 RLC 串联电路的 零状态响应	213	6.3 线性定常 RLC 串联电路的全 响应	221

6.4	GCL 并联电路的响应	223	习题	231
6.5	一般二阶电路的响应	225		

第七章 正弦稳态分析

7.1	线性定常电路的正弦稳态	234	7.6.2	耦合电感器的串联和并联、 互感消去法	262
7.2	正弦量	236	7.7	正弦稳态分析的一般方法	266
7.2.1	正弦量的概念	236	7.7.1	节点分析法	267
7.2.2	正弦量的有效值和平均值	237	7.7.2	改进的节点分析法	267
7.3	相量法	238	7.8	网络定理在正弦稳态分析中的 应用	269
7.3.1	正弦量的复数表示及相量	238	7.9	正弦稳态下电路的功率	272
7.3.2	相量法的数学含义	240	7.9.1	电阻器、电感器和电容器的 功率	272
7.3.3	相量法在微分方程中的 应用	242	7.9.2	正弦稳态下二端网络的功率	275
7.4	基尔霍夫定律的相量形式和电路元 件上电压与电流的相量关系	245	7.9.3	最大功率传输定理	279
7.4.1	基尔霍夫定律的相量形式	245	7.9.4	功率因数的提高	280
7.4.2	电路元件上电压与电流的相量 关系	245	7.10	电路中的谐振(共振)现象	282
7.5	阻抗和导纳	251	7.10.1	RLC 串联电路的谐振 现象	282
7.5.1	二端元件的阻抗和导纳	251	7.10.2	串联谐振电路的频率特性和 谐振曲线	285
7.5.2	二端网络(单口网络)的入端 阻抗和入端导纳	251	7.10.3	GCL 并联电路的谐振 现象	288
7.5.3	RLC 串联电路和 GCL 并联 电路	252	7.11	特勒根定理与复功率守恒	289
7.6	正弦稳态下网络的等效变换	257	习题	291	
7.6.1	正弦稳态下网络的等效条件 及有关公式	257			

第八章 三相电路

8.1	三相电路的基本概念	301	角形连接的对称三相电路	309	
8.2	三相电路的连接方式	303	8.3.4	复杂的对称三相电路	311
8.2.1	星形连接	303	8.4	不对称三相电路的计算	313
8.2.2	三角形连接	304	8.5	三相电路的功率	316
8.3	对称三相电路的计算	306	8.5.1	三相电路的平均功率和无功 功率	316
8.3.1	星形-星形连接的对称三相 电路	306	8.5.2	三相电路的瞬时功率	317
8.3.2	星形-三角形连接的对称三 相电路	307	8.5.3	三相电路功率的测量	318
8.3.3	三角形-星形连接或三角形-三		习题	320	

第九章 非正弦周期信号作用下电路的稳态分析

9.1 非正弦周期信号的三角级数展开.....	325	电路的稳态响应.....	333
9.2 非正弦周期信号的频谱.....	331	9.5 非正弦周期信号作用下电路中的功率.....	336
9.3 非正弦周期信号的有效值、平均值.....	332	9.6 在非正弦周期电压和电流作用下电路的谐振.....	340
9.4 非正弦周期信号激励下线性定常		习题	344

第十章 运算法及其应用

10.1 拉氏变换的定义	348	10.7.4 网络固有频率和网络变量固有频率	385
10.2 拉氏变换的基本性质	351	10.8 网络函数的定义和分类	387
10.3 拉氏反变换	357	10.9 网络函数的零点、极点和网络函数的图解求值	389
10.4 电路基本规律的复频域形式	363	10.9.1 网络函数的零点和极点	389
10.5 零状态响应和卷积定理	370	10.9.2 网络函数的图解求值	391
10.5.1 零状态响应	370	10.10 网络函数和冲激响应.....	393
10.5.2 卷积定理	372	10.11 网络函数的频率特性.....	397
10.6 网络定理在复频域分析中的应用	373	10.11.1 一阶网络函数的频率特性.....	397
10.6.1 戴维宁定理和诺顿定理在复频域分析中的应用	373	10.11.2 二阶网络函数的频率特性.....	400
10.6.2 互易定理在复频域分析中的应用	377	10.12 网络函数的零点对频率特性和冲激响应的影	407
10.7 固有频率	379	习题	408
10.7.1 固有频率的定义	379		
10.7.2 网络方程和网络固有频率	379		
10.7.3 零固有频率	382		

第十一章 双口网络

11.1 多口网络和双口网络	418	和互易性判据	425
11.2 双口网络不含独立电源时的方程及其参数	418	11.4 双口网络的相互连接	430
11.2.1 含短路导纳参数的双口方程	420	11.4.1 并联连接	430
11.2.2 含开路阻抗参数的双口方程	421	11.4.2 串联连接	432
11.2.3 含混合参数的双口方程	422	11.4.3 串-并联和并-串联连接	433
11.2.4 含传输参数的双口方程	424	11.4.4 级联连接	434
11.3 双口网络各参数间的换算关系		11.5 具有端接的双口网络	436
		11.6 双口网络含独立电源时的方程	437
		11.7 双口网络的等效电路	440
		习题	444

第十二章 状态变量法

12.1 概述	449	12.4 状态方程的解法	459
12.2 状态和状态变量	450	12.5 冲激响应矩阵与网络函数矩阵 的关系以及矩阵 A 的特征值与 网络固有频率的关系	464
12.3 状态方程的列写方法	452	习题	466
12.3.1 视察法	452		
12.3.2 抽出法	456		

第一章 集中参数电路和基尔霍夫定律

当今,几乎到处都可以看到各种实际电路。所谓实际电路就是由若干个电气器件按照特定的目的相互连接而构成的总体,在这个总体中具有电流赖以流通的路径。实际电路的种类是很多的。仅按其用途分类就有:通信电路、计算机电路、自动控制电路、电力电路、电气照明电路等。尽管这些电路的外貌、功能、结构以及设计方法各不相同,但它们却建立在同一个理论上,这个理论基础就是电路理论。

电路理论包括两方面的内容:一是电路分析,二是电路综合(设计)。粗略地说,前者是讨论如何在电路为已知的情况下,求出该电路对给定激励(输入)的响应(输出);后者则是研究如何构成一个电路,而这个电路能够对给定激励呈现出所预期的响应。本书的重点是放在前一个方面,即电路分析。

在电路理论里,讨论的不是实际电路,而是实际电路的模型——电路。后者是前者在一定条件下的科学抽象。满足集中化条件的实际电路抽象出的模型称为集中参数电路。本书只讨论集中参数电路。

1.1 集中参数电路

人们在长期的科学实验中总结出一种研究客观事物的科学方法。简略地说,这种方法是先为客观事物建立一个理想化的模型,再以此模型作为对象进行定性或(和)定量分析,然后根据分析所得到的结果作出合乎客观事物实际情况的科学结论。这种方法早已为各个学科的理论工作者所采用。例如,在电磁学中,人们用点电荷作为理想化的带电体模型来研究带电体与其本身所激发的电磁场之间的关系以及带电体在其所处电磁场中受到的作用;又如在力学中,人们用质点作为客观物体的理想化模型来研究客观物体的运动等。尽管这些方法对我们来说并不陌生,但有几点还是值得指出:(1)模型并非原物(原来的客观事物),而是原物的一种合乎一定条件的科学抽象。例如,点电荷就是带电体在可以不计其本身之大小和形状的条件下的一种抽象。(2)理想化模型虽是原物抽象而成,但却有本身的严格定义。例如,质点被定义为一个具有确定质量而无大小和形状的理想物体等等。(3)用理想化模型替代原物是对原物的一种逼近。显然,要得到最佳的逼近就要抽象出最佳的模型。当用一个理想化模型不足以最佳地逼近原物时,可以用多个或多种理想化模型的组合来逼近。

我们在研究基本电路理论时也采用了上述方法,把实际电路抽象为理想化模型,用对得到理想化模型的分析代替对实际电路的分析,并称实际电路的理想化模型为电路。由此可知,在电路理论中,实际电路和电路在概念上是有差异的,切不可混为一谈。

实际电路是由电气器件互相连接而成。所谓电气器件是一些由人们设计制造的实物(诸如发电机、电动机、变压器、变阻器、线圈、实际的电容器、晶体管、二极管、运算放大器等)的

总称。其特点是具有供作电气连接的外伸端点和通电后其内部会出现这种或那种电磁过程。电气器件按其外伸端点数之不同有二端和多端之分。既然电气器件是实际电路的组成者,所以对实际电路进行抽象,本质上是对电气器件进行抽象,即在一定的条件下将电气器件抽象为理想化模型。电气器件的模型可以是一个理想化模型,也可以是几个理想化模型之组合(视对逼近程度的要求而定)。理想化模型在这里是一些理想化的电路元件,简称电路元件。这样,作为实际电路之模型的电路显然是由一些电路元件连接而成。这一事实可以进一步引申出电路更确切的定义:

电路是实际电路的理想化模型,是由一些电路元件按特定方式互相连接而成的总体。在此总体中具有电流赖以流通的路径。

电路元件都具有严格的科学定义。类似于电气器件,按供外接的端点数不同有二端和多端之分。尽管对它们的具体描述放在本书的第二章内,但有一点值得我们牢记的,那就是:电气器件是实物,而电路元件是模型,两者是不容混淆的。

有了电路这一概念后,对本书所研究的对象——集中参数电路也就不难理解了。粗略地说,集中参数电路是表征那种满足集中化条件的实际电路的模型。若一实际电路的尺寸非常小,较之表征其内电磁过程的物理量[如电流 $i(t)$ 的和电压 $v(t)$]的波长来说,可以忽略不计,看成集中在空间的一点,则称该实际电路满足集中化条件。集中化条件总结成公式则是

$$d \ll \lambda, \quad (1.1a)$$

式中, d 为实际电路的最大尺寸; λ 为电磁信号(电流、电压之总称)的波长。当电磁信号的波速为光速 c 时,用 c 除上式之两边又得

$$\tau \ll T, \quad (1.1b)$$

式中, $\tau = d/c$ 是电磁信号从实际电路的一端传播到另一端所需时间; T 是电磁信号的周期。上面两式统称为电路的集中化判据。

客观世界里不存在没有尺寸的实际电路,但具有一定尺寸又能符合上述条件的实际电路确实是有的。下面举两个例子,以便加深理解。

例 1.1 若一高保真音响系统所允许信号的最高频率为 25 kHz,最低频率为 20 Hz,则最高频率的波长

$$\lambda_{\text{高}} = c/f_{\text{高}} = 3 \times 10^8 / 25 \times 10^3 = 12 \text{ km},$$

最低频率信号的波长

$$\lambda_{\text{低}} = c/f_{\text{低}} = 3 \times 10^8 / 20 = 15\,000 \text{ km}.$$

显而易见,一个可以摆在房间内的音响系统的尺寸与 $\lambda_{\text{高}}$ 相比已经远远小于后者,更不用说与 $\lambda_{\text{低}}$ 相比了。因此它能满足集中化条件。

例 1.2 有一集成在硅片上的计算机电路,在硅片上的长、宽皆为 1mm。现知其内信号的最短周期为 0.1ns(1ns = 10^{-9} s)。于是有

$$\tau = d/c = 1 \times 10^{-3} / 3 \times 10^8 = 0.33 \times 10^{-11} \text{ s} = 0.003\,3 \text{ ns},$$

$$T = 0.1 \text{ ns}$$

和

$$\tau \ll T,$$

显然,符合判据式(1.1b)。

仔细分析一下上述判据式(1.1a)便能发现:一个实际电路的电磁信号频率越高,亦即电磁信号的波长越短,则其符合集中化条件要求的尺寸就越小。

一个实际电路满足集中化条件时可以被看成一点,是在以“小”比“大”的情况下对“小”的一种抽象。这同将地球与宇宙相比可将地球看成一点完全一样。这样的抽象有着很大的实际意义。因为将实际电路作为一个点而不考虑空间因素,我们就能作出其内的电磁信号(电压、电流等)仅是时间的函数,而与空间坐标无关的结论。所以在集中参数电路内,电流、电压都可记 $i(t), v(t)$ 。

一个实际电路若不满足集中化条件,则其模型称为分布参数电路。由于此时不能作为一点,要考虑尺寸,所以这种电路中的电流、电压不仅与时间有关,而且还与空间坐标有关,也就是说,是时空函数,可记为 $i(t, x), v(t, x)$ 。本书不讨论分布参数电路,但可指出,分布参数电路能用集中参数电路构成的序列来逼近。

不难断定,满足集中化条件之实际电路中的电气器件必然满足集中化条件,而与之相应的集中参数电路的电路元件亦必然满足集中化条件。此时的电气器件和电路元件,我们分别简称为集中参数器件和集中参数元件。两者也有二端和多端之分。

至此,我们可以像给予电路那样给集中参数电路下一个严格的定义:

集中参数电路是实际电路满足集中化条件时的模型,是由集中参数元件按特定方式互连接而成的总体,在总体内具有电流赖以流通的路径。

无论是根据理论(电磁场理论)或者实践都证实了在满足集中化条件的实际电路中恒有:

1. 在任何时刻,流入二端集中参数器件任一端点的电流等于从另一端点流出的电流,且该器件两个端点上的电位均为确定值(对选定的基准节点或称参考节点而言);
2. 在任何时刻流入多端集中参数器件任一端点的电流等于从其他端点流出电流之和,且其任一端点上的电位均为确定值(对选定的基准节点而言)。

这个结论当然对作为上述实际电路模型的集中参数电路同样有效。

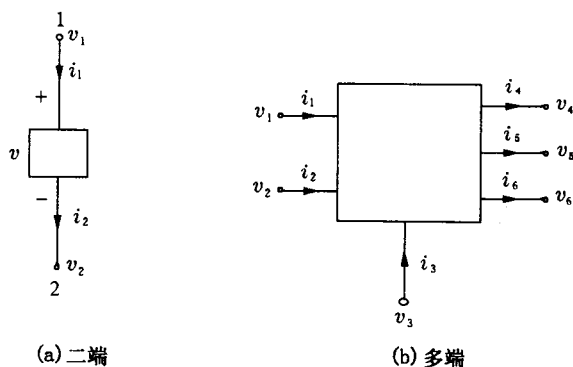


图 1.1 集中参数元件的符号

图 1.1a 和图 1.1b 分别表示出集中参数电路的一个二端集中参数元件和一个多端集中参数元件。(这是一种用黑箱子表示电路元件的方法,这种表示方法的特点是对任何元件都使用同一种符号而不问元件的具体性质如何。具体元件尚有各自独有的表示符号,这在以后会逐步介绍)。按上所说,对图上的二端集中参数元件应有:

$$i_1(t) = i_2(t) = i(t), \quad (1.2a)$$

即流入端点 1 的电流等于流出端点 2 的电流,以及

$$v_1(t) - v_2(t) = v(t), \quad (1.2b)$$

即作为端点 1 与端点 2 电位之差的电压 $v(t)$ 具有完全确定的值。式中 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 分别是端点 1 和端点 2 的电位(对任意选定的基准节点而言)。

对图上的多端集中参数元件,有

$$i_1(t) = -i_2(t) - i_3(t) + i_4(t) + i_5(t) + i_6(t), \quad (1.2c)$$

即流入元件的电流等于由元件流出的电流(此式右端 $i_2(t), i_3(t)$ 前取负号是因为两者为流入,可看成负的流出),以及

$$v_{ij}(t) = v_i(t) - v_j(t), \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ 但 } i \neq j, \quad (1.2d)$$

即作为任意两个端点电位之差的电压 $v_{ij}(t)$ 具有完全确定的值。

上述公式(1.2)是集中参数元件所具有的共性的数学表达式,是我们赖以识别集中参数元件的有力工具。总而言之,凡集中参数元件必具有这种性质,反之亦真。

最后指出,为一个集中参数器件建造一个足以逼近该器件的合适模型在电路理论中称为器件建模(或造型)。这是当今许多人从事研究的课题。一般说来,一个模型要较好地逼近集中参数器件往往需要用多个集中参数元件组合而成。但这也不是绝对的,因为在一定的条件下(特别是考虑到集中参数器件的实际工作条件时),模型还可能简化,甚至简化成只由一个集中参数元件组成。现以一个实际的电阻器(如通常实验室内做实验用的铜导线绕制的变阻器)为例来说明这一点。对它来说,一个能较好逼近的模型是用第二章中所讲的理想化电路元件——电阻器、电感器、电容器组合而成的。若用我国规定表示这三种元件的符号(见图

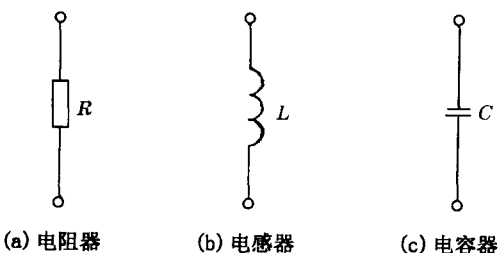


图 1.2 三种元件的符号

1.2), 则变阻器在甚高频时的模型如图 1.3a 所示。在这里是用电阻器 R 来模拟电流流过变阻器时引起的能量损失(电能转换成热能);用电感器 L 来表征电流流过变阻器时所建立起的磁场;用电容器 C 来体现电流流过变阻器时所引起的电场。这个模型比较复杂,实践证明,除去在甚高的频率下为了能全面体现变阻器的性能必须使用这个模型外,在一般高频和中频、低频

下可以将其进一步简化。当工作频率为一般高频时,因电场的变动而引起的位移电流已不足以与变阻器中的传导电流相比拟,而可以略去不计。于是可以从模型中除去用来体现电场存在的电容器 C , 使模型简化成如图 1.3b 所示的形式。若进一步使频率降低成中频和低频,因磁场的变动而产生的感应电压在变阻器的端电压中所占的比例将变得很小,故可以略而不计。于是用来表征磁场的电感器又能除去,结果,模型变成只由一个电阻器 R 组成(见图 1.3c)。

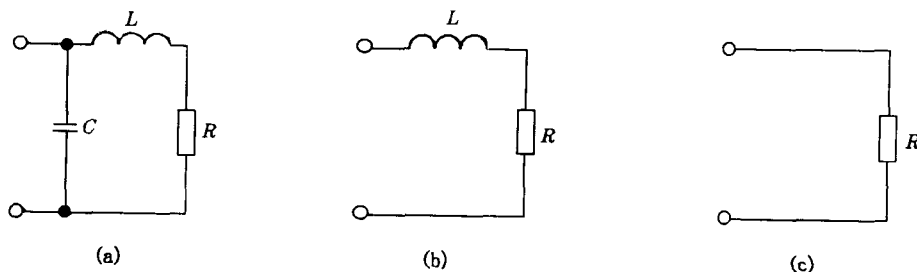


图 1.3 在不同工作频率下的变阻器模型

以后,如果不作另外说明,本书将集中参数电路一概简称为电路,而且所说的电路又都是已完成器件建模的实际电路的模型。

1.2 基尔霍夫定律

电路处于工作状态时,在其内部必然进行着这种或那种电磁过程。表征这些电磁过程的物理量是:电流 $i(t)$ 、电压 $v(t)$ 、磁通 $\phi(t)$ 和电荷 $q(t)$ 。有关这四个量的定义和诸量之间的关系已在物理学中有所讨论,我们不再重复。在电路理论中称这四个量为电路变量。在此四个量中用得最多的是电流 $i(t)$ 和电压 $v(t)$ 。在集中参数电路中电流、电压要受到两种约束:一种约束是来自组成电路的元件,因为元件上的电流和电压必须满足电路元件所具有的电压-电流关系;另一种约束则是来自电路元件的互连方式,因为电路元件之间的互连必然迫使诸元件中的电流之间和诸元件上的电压之间有联系或者说约束,体现这种约束的是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律有两个,即基尔霍夫第一定律和第二定律。第一定律又称基尔霍夫电流定律,简记为 KCL;第二定律又称基尔霍夫电压定律,简记为 KVL。第一定律(KCL),是电流连续性原理在集中参数电路上的体现,其物理背景是电荷守恒公理;而第二定律(KVL)则是电场为位场时电位的单值性在集中参数电路上的体现,其物理背景是能量守恒公理。

在正式介绍基尔霍夫定律之前,先介绍一些与电路有关的名词。在电路中,一个二端元件或一个二端元件和电源的组合称为支路。两条或两条以上支路的连接点称为节点。例如图 1.4 表示电路具有 4 个节点(记作①,②,③和④)和 6 条支路(记作 1,2,3,4,5 和 6)。支路两端之间的电压称为支路电压,流经支路的电流称为支路电流。例如 i_1 是支路 1 的支路电流, v_1 是支路 1 的支路电压等。

在讨论基尔霍夫定律和以后分析电路时,要涉及到电流和电压的方向,而我们事先往往很难判断出支路电压和支路电流的真实方向。为解决这个问题,可采用先任意假定它们方向的办法。这种任意假定的方向称为参考方向。电压的参考方向又称参考极性,用画在元件两端的“+”号和“-”号表示,而电流的参考方向则用附在支路上的箭头表示(见图 1.4 中的支路)。参考方向之所以可以任意地指定,是因为它本身并不表示电路所发生的实际物理过程。但是,在参考方向选定之后,我们可以把计算所得的电压、电流的正负值和其参考方向联系起来考虑,从而确定出它们的真实方向。例如,图 1.4 中支路电压 v_1 在时间 t 时为正,即 $v_1(t) > 0$,表示电压 v_1 在时间为 t 时的真实极性和图中标明的极性相同。若 v_1 在时间 t 时为负,即 $v_1(t) < 0$,则表示其真实极性和图中所标明的极性相反。类似地,支路电流 i_1 在时间 t 时为正,表示电流 i_1 在时间为 t 时的真实方向和所标明的参考方向相同,反之则相反。应当指出的是,虽然电压、电流的参考方向可以独立地选定,但本书中对不含有电源的支路多数按下述之约定来选取电流和电压的参考方向,即电流必须从标以“+”号的端点流入

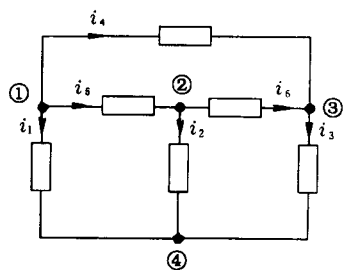


图 1.4 具有 4 个节点和 6 条支路的电路

支路和从标以“-”号的端点流出支路。我们把这样的电压和电流的参考方向称为一致参考方向(也称关联参考方向)。请注意,在一致参考方向下,乘积 $v(t)i(t)$ 等于支路在时间 t 时所

吸收的功率。

1.2.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(KCL):对于任一集中参数电路的任一节点,在任一时刻,流出(或流入)该节点的电流的代数和等于零。

对节点应用 KCL 时,一般取离开节点的电流为正,指向节点的电流为负。例如,对图 1.5 所示电路应用 KCL 可得

$$\text{节点①} \quad -i_1 + i_2 = 0, \quad (1.3a)$$

$$\text{节点②} \quad -i_2 + i_3 + i_4 = 0, \quad (1.3b)$$

$$\text{节点③} \quad -i_3 + i_5 = 0, \quad (1.3c)$$

$$\text{节点④} \quad i_1 - i_4 - i_5 = 0. \quad (1.3d)$$

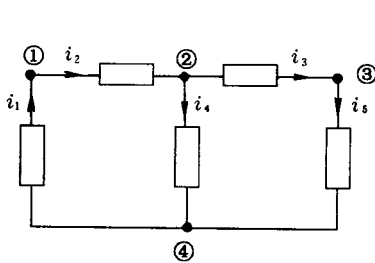


图 1.5 说明 KCL 的例子

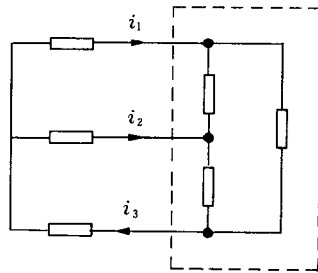


图 1.6 KCL 运用于闭合面

根据 KCL 写出的方程称为 KCL 方程。

虽然 KCL 是我们熟悉的,但有必要强调下列几点:

1. KCL 方程是一个系数为常数 1, 0 及 -1 的线性齐次代数方程,它表明了各个电流所受的线性约束。

2. KCL 适用于任何集中参数电路。它仅与元件的相互连接方式有关,而与元件的性质无关。所以我们说,KCL 反映了电路的互连性质。

3. KCL 不仅适用于集中参数电路中的任一节点,而且对电路中任一假设的闭合面也是适用的。在图 1.6 所示电路中有三条支路穿过由虚线构成的闭合面,支路电流分别为 i_1 , i_2 , i_3 ,我们可以把闭合面(闭合面也称高斯面)看成广义节点,对广义节点应用 KCL 有

$$-i_1(t) - i_2(t) + i_3(t) = 0.$$

4. 对任一具有 n 个节点, b 条支路的电路列写 KCL 方程,所得方程组中的独立方程只有 $n-1$ 个。例如我们把式(1.3)所示的四个方程相加,可以发现现在所得的方程中所有的支路电流都出现两次,一次是正的,一次是负的。于是所得方程为 $0 \equiv 0$ 。这个结果表明 KCL 方程并非都是独立的。事实上,式(1.3)所示的四个方程中,任何一个方程都可以由其他三个方程相加并乘以 -1 而得到。所以,它们中间只有三个是独立方程。推而广之,如果把对 n 个节点分别写得的 n 个 KCL 方程相加,必定有

$$\sum_{j=1}^b [(+i_j) + (-i_j)] \equiv 0$$

式中 b 是支路数。这是容易理解的。因为每个支路是连接在两个节点之间的,并且每个支路电流是从一个节点流入而从另一节点流出,所以对于 n 个 KCL 方程来说,如果把前 $n-1$ 个节点的 KCL 方程相加,则除了汇集到第 n 个节点的电流之外,其余的电流都被抵消。于是,就得到第 n 个节点的 KCL 方程。显然,这个方程是前 $n-1$ 个 KCL 方程的线性组合,是非独立的,而前 $n-1$ 个 KCL 方程之间则是线性无关的。由上述可知,对 n 个节点列 KCL 方程,只有 $n-1$ 个 KCL 方程是独立的。

为了得到独立的 KCL 方程,我们多是采用这样的方法,即不对全部节点写出方程,而是只对除去一个所谓基准节点后剩下的 $n-1$ 个节点写 KCL 方程。

1.2.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(KVL):对任一集中参数连通电路中的任一回路,在任一时刻,沿此回路各支路上的电压代数 sum 等于零。

在应用 KVL 时,应指定回路的循行(绕行)方向。循行方向可任意选取,可以取顺时针方向,也可以取逆时针方向。当支路电压的参考方向与回路的循行方向相一致时,我们对这个电压取正号,反之则取负号。

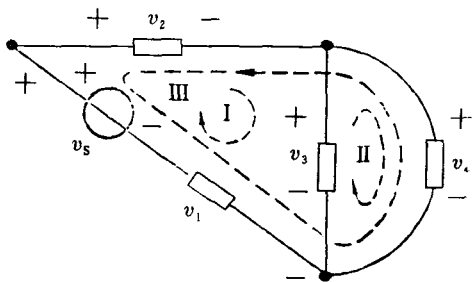


图 1.7 说明 KVL 的例子

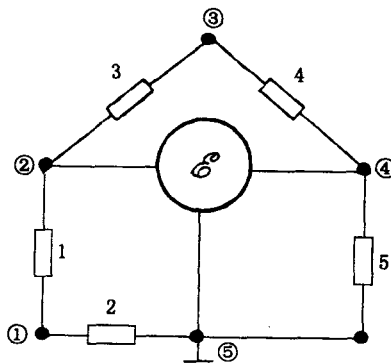


图 1.8 用于说明 KVL 的连通电路

例如对图 1.7 按所取循行方向应用该定律可得方程:

$$\text{回路 I} \quad -v_1 + v_2 + v_3 = 0, \quad (1.4a)$$

$$\text{回路 II} \quad -v_3 + v_4 = 0, \quad (1.4b)$$

$$\text{回路 III} \quad v_1 - v_2 - v_4 = 0. \quad (1.4c)$$

根据 KVL 写出的方程称为 KVL 方程。对 KVL 方程,也应强调下列几点:

1. KVL 方程是一种系数为常数 1, 0 及 -1 的线性齐次代数方程。它表明了各个电压所受的线性约束。

2. KVL 适用于任何集中参数电路。它仅与元件的连接方式有关,而与元件的性质无关。所以我们说,KVL 反映了电路的互连性质。

3. 对于集中参数连通电路中的任一对节点 j 和 k ,在任一时刻,位于这两个节点之间的电压 $v_{jk}(t)$ 等于两者相对于任意所选基准节点的电位 $v_{nj}(t)$ 和 $v_{nk}(t)$ 之差,即

$$v_{jk}(t) = v_{nj}(t) - v_{nk}(t). \quad (1.5)$$