



应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材
21世纪普通高等教育优秀教材

电路理论

王宏远 张年凤 邓 奕 主 编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材
21 世纪普通高等教育优秀教材

电 路 理 论

主 编 王宏远 张年凤 邓 奕
副主编 刘雅娴 云彩霞 陈振云
参 编 李 慧 李 勇

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是为大学本科电类相关专业的“电路理论”课程编写的教材,其内容符合国家电路课程教学指导委员会对高等学校电路课程教学的基本要求,并且在包含基本内容的基础上稍加扩展,突出学习方法,训练思维方式,做到了准确、简明、高效。

全书共 13 章。第 1 章至第 8 章涵盖了电路的基本元件、基本定律、基本定理、一般分析方法、一阶和二阶电路、正弦稳态电路、三相电路、非正弦周期电流电路等内容,第 9 章至第 13 章则包含动态电路的复频域分析法(拉氏变换法)、双口网络、状态方程、开关电容网络和分布参数电路的稳态分析等内容。课程的总学时可以在 80~110 学时之间灵活掌握。

为了方便教学,本书还配有电子课件,任课教师和学生可以登录我们爱读书网(www.ibook4us.com)免费注册下载。

本书适合于普通高等院校电类(强电、弱电)专业的师生使用,也可以作为电力、电子、自动化、计算机、通信和电信等专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论/王宏远 张年凤 邓 奕 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2012.1
ISBN 978-7-5609-7497-2

I. 电… II. ①王… ②张… ③邓… 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(2011)第 232396 号

电路理论

王宏远 张年凤 邓 奕 主编

策划编辑:康 序

责任编辑:康 序

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉兴明图文信息有限公司

印 刷:武汉市宏隆印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:22.75

字 数:603 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:43.00 元



华中科大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

只有无知，没有不满。

Only ignorant, no resentment.

.....迈克尔·法拉第(Michael Faraday)

迈克尔·法拉第(1791—1867)：英国著名物理学家、化学家，在电磁学、化学、电化学等领域都作出过杰出贡献。

应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材

编 审 委 员 会 名 单

(按姓氏笔画排列)

卜繁岭	于惠力	方连众	王书达	王伯平	王宏远
王俊岭	王海文	王爱平	王艳秋	云彩霞	尼亚孜别克
厉树忠	卢益民	刘仁芬	朱秋萍	刘 锐	刘黎明
李见为	李长俊	张义方	张怀宁	张绪红	陈传德
陈朝大	杨玉蓓	杨旭方	杨有安	周永恒	周洪玉
姜 峰	孟德普	赵振华	骆耀祖	容太平	郭学俊
顾利民	莫德举	谈新权	富 刚	傅妍芳	雷升印
路兆梅	熊年禄	霍泰山	魏学业	鞠剑平	

前言

PREFACE

电路理论是高等学校电气、自动化、信息学科等相关专业的一门重要的学科基础课程,是电气与信息学科各专业学生在大学期间接触到的第一门系统论述电路的基本概念、电路的基本规律、电路的基本分析方法的课程,对各相关专业学生许多后续课程的学习有着极为重要的作用,是每一位从事电力、电气、自动化、通信、计算机和自动控制专业工作人员的知识基础,其重要性是不言而喻的。本书写作的初衷是想让读者通过对本书的学习,掌握电路理论中最基本的知识,确保其对后续课程的学习“够用”,同时也要有一定的拓展空间。

本书内容由 13 章组成,其中基本部分为第 1 至第 6 章,主要介绍了电路分析的三种基本规律(电路元件约束规律、电路拓扑结构约束规律和基本信号规律),电路的基本分析方法,电路的基本定理及其应用。第 7、9 两章也建议作为基本内容,但是讲课时可以控制难度。第 8、10、11、12、13 章一般作为参考内容,这几章中的大部分内容都将在研究生课程中有所涉及和讲授,可以根据课时安排,灵活处理。

本书的主要特点如下。

第一,既系统地阐述了理论,又突出了工程应用,做到了理论联系实际、理论与实用技术相结合。

第二,既讲述电路理论的基本概念、规律和分析方法,又将电路理论中的新方法、新成果融入本书中;既反映了学科发展的趋势,也有利于学生创新能力的培养。

第三,将电路分析基础、网络系统理论和电路设计有机地融合在一起,避免了三部分内容独立设课造成学时过多、内容交叉重复的问题,有利于学生的学习。

第四,以有源电路系统为研究对象,例题丰富,具有典型性和启发性。

本书内容的特点为准确、简明、高效,并且配合了一定数量的、能达到检验学习效果 and 加深理解理论知识、培养解题和应用能力及训练思维方式的习题。书中避免了烦琐的文字叙述、数学公式的推导及枯燥的题海,从而将学生从“学海无涯苦作舟”中解放出来,使学生能够一看就懂、一学就会、欲罢不能、兴趣盎然。学习电路理论何苦之有? 其乐无穷。

王宏远、张年凤、邓奕担任本书主编,负责提纲的制定和全书的编写工作。刘雅娴、云彩霞、陈振云担任副主编,为全书的编写提供了不少素材,并做了大量的基础工作。李慧、李勇担任参编。在撰写该书期间,得到了前辈、同事、朋友的关心、支持和帮助,在此深表感谢。

书中的错误和不当之处,恳请读者批评指正。如果读者在教学、实践或学习过程中,需要本书配套的电子教案,均可通过电子邮件 402345008@qq.com 与我们交流并索取。

相关的教学资源包,任课教师和学生也可以登录我们爱读书网(www.ibook4us.com)免费注册下载。

编 者

2011 年 11 月

目
录

CONTENTS

第 1 章 基尔霍夫定律和电路的基本元件	(1)
1.1 电路理论中的常用变量及基尔霍夫定律	(1)
1.2 理想二端电阻元件及欧姆定律	(10)
1.3 理想独立电源与实际电源	(14)
1.4 理想二端电容元件和理想二端电感元件	(18)
1.5 理想运算放大器	(28)
1.6 理想受控源	(30)
习题 1	(32)
第 2 章 电阻电路的等效变换	(37)
2.1 电桥电路	(37)
2.2 纯电阻电路中电阻的 Y 形联接与 Δ 形联接的等效变换	(39)
2.3 电源的转移	(41)
2.4 含受控源电路的等效化简	(43)
习题 2	(45)
第 3 章 电路分析的一般方法	(49)
3.1 电路分析的一般原则及标准支路方程	(49)
3.2 图论的基础知识	(50)
* 3.3 关联矩阵	(54)
3.4 KCL、KVL 的矩阵表达式	(59)
3.5 支路电流法	(63)
3.6 节点电位法	(66)
3.7 网孔电流法	(69)
3.8 回路电流法	(71)
习题 3	(74)
第 4 章 线性网络的电路定理	(78)
4.1 替代定理	(78)
4.2 叠加定理	(80)
4.3 戴维南定理和诺顿定理	(83)
4.4 特勒根定理(拟功率守恒定理)	(88)

4.5	互易原理	(90)
	习题 4	(95)
第 5 章	动态电路的时域分析	(99)
5.1	一阶电路	(99)
5.2	二阶电路	(114)
5.3	高阶电路	(127)
5.4	卷积积分	(131)
	习题 5	(137)
第 6 章	正弦稳态分析	(143)
6.1	正弦函数及其相量表示法	(143)
6.2	线性定常 RLC 元件的伏安特性的相量表示及基尔霍夫定律的相量表示	(145)
6.3	广义欧姆定律、复阻抗及复导纳	(148)
6.4	简单正弦电路的稳态分析	(151)
6.5	正弦稳态电路的功率	(153)
6.6	提高功率因数	(158)
6.7	负载获取最大功率(最大功率传输定理)	(160)
6.8	谐振	(163)
6.9	互感耦合电路	(169)
	习题 6	(180)
第 7 章	三相电路	(182)
7.1	对称三相电源与对称 Y-Y 形联接三相电路	(182)
7.2	对称 Δ 形联接的三相电源与负载	(184)
7.3	对称 Y- Δ 形联接电路及对称 Δ -Y 形联接电路	(186)
* 7.4	不对称三相电路	(188)
7.5	三相功率的测量	(193)
	习题 7	(194)
第 8 章	非正弦周期电流电路的稳态分析	(197)
8.1	非正弦周期函数的分解	(197)
8.2	线性定常电路对周期性激励的稳态响应的频域分析法	(200)
8.3	非正弦周期函数的有效值及平均功率	(201)
8.4	滤波器的概念	(204)
8.5	傅里叶级数的指数形式和周期函数的频谱	(206)
8.6	对称三相非正弦周期电流电路	(209)
	习题 8	(213)
第 9 章	动态电路的复频率分析(拉普拉斯变换法)	(216)
9.1	拉普拉斯变换及拉普拉斯反变换	(216)
9.2	拉氏变换的基本性质	(218)
9.3	拉氏反变换的部分公式展开法	(225)
9.4	电路基本规律的复频域形式	(230)
9.5	运算法	(232)
9.6	网络函数	(236)
	习题 9	(243)

第 10 章 双口网络	(246)
10.1 双口网络	(246)
10.2 双口网络的短路导纳矩阵(参数)和开路阻抗矩阵(参数)	(247)
10.3 双口网络的混合参数矩阵 H	(250)
10.4 双口网络的传输参数矩阵 T	(251)
10.5 各参数矩阵之间的关系及双口网络的互易性	(251)
10.6 双口网络的等效电路	(253)
10.7 双口网络的联接	(256)
10.8 有载双口网络	(259)
习题 10	(263)
第 11 章 网络分析的状态变量分析法	(266)
11.1 网络的状态变量和状态方程	(266)
11.2 状态方程的复频域解法	(271)
11.3 状态方程的时域解法	(273)
习题 11	(276)
第 12 章 分布参数电路的稳定状态	(278)
12.1 电路参数的分布性及分布参数电路	(278)
12.2 正弦电源作用下的传输线方程的稳态解	(279)
12.3 行波	(282)
12.4 均匀长线的传播特性	(287)
12.5 无畸变线	(290)
12.6 波的反射系数与无反射波	(292)
12.7 均匀长线的入端阻抗	(296)
12.8 无损耗线	(298)
12.9 均匀长线的集中参数等效电路	(304)
12.10 对称双口网络的传输(传播)常数与特性阻抗	(307)
习题 12	(309)
第 13 章 开关电容网络简介	(311)
13.1 开关电容元件的特性	(311)
13.2 开关电容网络简介	(313)
13.3 开关电容网络(SCN)中的一些非理想因素	(317)
习题 13	(318)
附录	(319)
附录 A 简单非线性电阻电路的分析	(319)
附录 B 常用函数的傅里叶级数展开式	(323)
附录 C 一些常用函数的拉氏变换	(324)
附录 D 双口网络各参数矩阵之间的关系	(325)
附录 E 正弦相量两种化简方法的对比	(325)
附录 F 电路理论中常用专业名词中英文对照	(326)
习题答案	(344)
参考文献	(352)

第①章 基尔霍夫定律和电路的基本元件



1.1 电路理论中的常用变量及基尔霍夫定律

1.1.1 电路理论中的常用变量

在电路理论中一般的常用变量有电压(降)、电流和电功率。有时也会用到电位、电能、电荷、磁通、磁通链等。电压用小写字母 u 或 v 表示,电流用小写字母 i 表示;电功率用字母 P 表示。

1. 电流

从物理学中我们已经知道,电荷质点的运动称为电流。在物理学中已经学到过电流强度的概念。我们将单位时间内通过导体横截面积的电量定义为电流强度,用 i 表示,其方向规定为正电荷移动的方向。其计算公式如下。

$$i = \frac{dq(t)}{dt}$$

式中, q 的基本单位为库仑(C), t 的基本单位为秒(s), 电流强度(i)的基本单位为安培(A)。其中, $10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$ (毫安), $10^{-6} \text{ A} = 1 \mu\text{A}$ (微安), $10^3 \text{ A} = 1 \text{ kA}$ (千安), $10^6 \text{ A} = 1 \text{ MA}$ (兆安)。

电流强度(i)用于衡量电流的大小,简称电流。所以 i 既是物理现象又是强度(大小)的表示。电流就其成因来看大致可以分成以下三类。

(1) 传导电流。在金属导体中自由电子的有规则的运动,以及在电解质中正负离子的有规则的运动都称为传导电流。

(2) 运流电流。电子、离子甚至宏观带电体在空间中作机械运动形成运流电流。

(3) 位移电流。由公式 $i = \frac{dq(t)}{dt}$ 可知,如果有交变电压加在电容器的两极板上,由于电场的交替改变,在接有电容器的电路中的导体各横截面的电量也随时间变化而变化,电路中也会形成电流,这种电流称为位移电流。

电流的速度为电磁场建立的速度,也就是光速。即为 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

电流按其大小与方向是否随时间而改变,又可以分为以下两类。

(1) 稳恒电流。其电流的大小、方向都不随时间而改变,是恒定不变的值,又称之为直流,用大写的 I 表示。测量仪表上其标志为 DC(直流电流表)。

(2) 交变电流。其电流的大小、方向都随时间而改变,简称为交流,用 $i(t)$ 表示。测量仪表上其标志为 AC(交流电流表)。

注:只改变大小、不改变方向的电流称为脉动电流。如正弦交变电流通过半波整流或全波整流后的电流,只改变了大小,未改变方向,故为脉动电流,现将其都归为交流电流。

电流的规定正方向为正电荷移动的方向,但是在复杂电路中如果未经计算则很难判断电流的正方向,并且如果是交流电流也无法在图中标示出每一瞬间电流的方向。因此,有必要在电路图中预先规定各支路电流的参考方向。当真实方向与参考方向一致时,电流的代

数值为正;当真实方向与参考方向相反时,电流的代数值为负。

图 1-1 与图 1-2 中 i 的方向都是参考方向,但通过计算后得出图 1-1 中 $i_1 = 3 \text{ A}$,说明其电流的真实方向与参考方向相同,确实是从 a 点流到 b 点的 3 A 电流。而计算后得出图 1-2 中 $i_2 = -5 \text{ A}$,说明其真实方向与参考方向相反,不是从 c 点流到 d 点,而是从 d 点流到 c 点,真实方向用虚线-----及 i'_1 和 i'_2 表示。

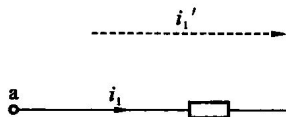


图 1-1 电流的真实方向与参考方向相同

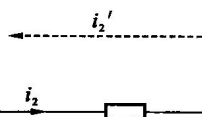


图 1-2 电流的真实方向与参考方向相反

由上述分析,可得出以下结论。

(1) 电路分析计算之前必须规定电流的参考方向,并在图中标示出来。

(2) 电流的真实方向由计算结果(代数值)与参考方向共同确定:代数值为正,说明电流的真实方向与参考方向相同;代数值为负,说明电流的真实方向与参考方向相反。

(3) 电流是标量,不是矢量。

2. 电压

两点间的电位之差称为电压。

在库仑场中,由于库仑场是保守力场,故电荷处于电场中不同的位置将具有不同的电位能。电荷在电场中移动时,电场力所做的功是电位能改变的量度,将试验电荷 q_0 从 a 点移到 b 点,电场力做功为 ΔW_{ab} 。

$$\Delta W_{ab} = W_a - W_b = q_0 \int_{(a)}^{(b)} \vec{E} d\vec{l} = q_0 \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} - q_0 \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$$

式中, $\vec{E}$ 为电场强度; $q_0 \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$ 是 q_0 在电场中 a 点所具有的电位能; $q_0 \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$ 是 q_0 在电场中 b 点所具有的电位能。

而单位电荷所具有的电位能称为电位,故 a 点的电位 $U_a = \frac{q_0 \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}}{q_0} = \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$ 。同理, b

点的电位 $U_b = \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l}$, 其中无穷远(∞)点,称为参考电位点,其电位为零。

所以电位是电场的固有属性的表征,仅与产生电场的电荷有关,而与试验电荷无关。

两点间的电位之差就称为电位差,又称为电压。用 u 或 U 表示。

$$u_{ab} = U_a - U_b = \frac{W_a}{q_0} - \frac{W_b}{q_0} = \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} - \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} = \int_{(a)}^{(b)} \vec{E} d\vec{l}$$

U_{ab} 仅与两点的位置有关,与计算路径无关。如图 1-3 所示, a、b 两点之间的电压仅仅取决于 a、b 两点,而与是经过 a→g→b 还是经过 a→f→b 无关,这一结论可证明如下。

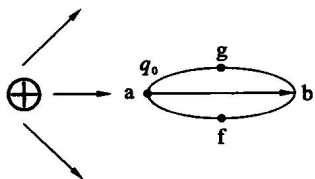


图 1-3 正电荷由 a 点移到 b 点,电场力做功与路径无关,只与 a、b 两点有关

$$\begin{aligned}
 \int_{a \rightarrow g \rightarrow b} \vec{E} d\vec{l} &= \int_{(a)}^{(g)} \vec{E} d\vec{l} + \int_{(g)}^{(b)} \vec{E} d\vec{l} \\
 &= \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} - \int_{(g)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} + \int_{(g)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} - \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \\
 &= \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} - \int_{(b)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \\
 &= \int_{(a)}^{\infty} \vec{E} d\vec{l} + \int_{\infty}^{(b)} \vec{E} d\vec{l} \\
 &= \int_{(a)}^{(b)} \vec{E} d\vec{l} = u_{ab} \\
 u_{ab} &= \frac{dw}{dq}
 \end{aligned}$$

式中: w 表示能量, 单位为焦耳(J); q 表示电荷量, 单位为库仑(C); u_{ab} 表示 a、b 点间的电压, 单位为伏特(V)。

其中: $10^{-3} \text{ V} = 1 \text{ mV}$ (毫伏); $10^{-6} \text{ V} = 1 \mu\text{V}$ (微伏); $10^3 \text{ V} = 1 \text{ kV}$ (千伏); $10^6 \text{ V} = 1 \text{ MV}$ (兆伏)。

电压按其大小、方向是否随时间而改变也可以分为直流电压和交流电压两大类。

(1) 直流电压: 其大小、方向都不随时间而改变, 是恒定值, 简称为直流, 用大写 V 表示。

(2) 交流电压: 其大小、方向都随时间而改变, u_{ab} 是时间的函数, 简称为交流, 用 $u(t)$ 表示。

同样, 在分析计算之前必须先假定电压的参考方向(参考极性)。用“+”表示高电位端, 用“-”表示低电位端, 标示在元件或支路的两端。如果计算结果的代数值为正, 则表明, 该段电路电压的真实方向与参考方向相同; 如果代数值为负, 则表明, 该段电路电压的真实方向与参考方向相反。如图 1-4 与图 1-5 所示, 图 1-4 中的 u_{ab} 为参考方向, 假设计算结果 $u_{ab} = 3 \text{ V}$ 则表示 u_{ab} 的真实方向与参考方向相同, 确实是 a 端为高电位端, b 端为低电位端, 用 u'_{ab} 表示。而假设图 1-5 中计算结果 $u_{cd} = -5 \text{ V}$ 则表示该段电路电压的真实方向与参考方向相反, 所以其真实情况是 d 端为高电位端, c 端为低电位端, 用 u'_{cd} 表示。

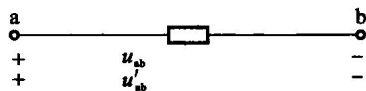


图 1-4 电压的真实方向与参考方向相同

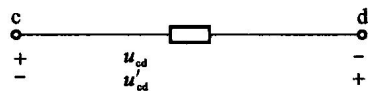


图 1-5 电压的真实方向与参考方向相反

当假定的电流从支路的高电位端流向低电位端时, 这种电流、电压的参考方向称为关联参考方向, 简称为关联方向, 如图 1-6 所示。

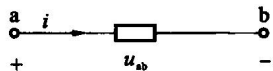


图 1-6 电压电流的关联参考方向

3. 电功率

在单位时间内电场力所做的功, 或者单位时间所转换的电能, 称为电功率, 用 P 表示。

由 $u_{ab} = \frac{dw}{dq}$ 可知, $dw = u_{ab} dq$ 。

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{u_{ab} dq}{dt} = i u_{ab}$$

式中: P 表示功率, 单位为瓦特(W)。

其中, $10^{-3} \text{ W(瓦)} = 1 \text{ mW(毫瓦)}$, $10^{-6} \text{ W(瓦)} = 1 \mu\text{W(微瓦)}$, $10^3 \text{ W(瓦)} = 1 \text{ kW(千瓦)}$, $10^6 \text{ W(瓦)} = 1 \text{ MW(兆瓦)}$ 。

显然,该式中 u_{ab} 与 i 的方向是关联方向。在 iu_{ab} 的关联方向下,若 $u_{ab} > 0, i > 0, P > 0$, 则说明电压的真实方向与假定的参考方向相同,电流的真实方向与参考方向也相同,正电荷从高电位移动到低电位,电场力做功,电能减少,该段电路吸收功率(吸收能量)。如图 1-7 所示, q_0 为试验电荷或任意正电荷。

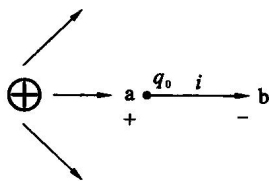


图 1-7 正电荷电场中,正试验电荷 q_0 从高电位移向低电位

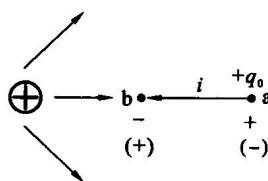


图 1-8 正电荷电场中,正试验电荷 q_0 从低电位移向高电位

$P = iu_{ab} < 0$ 时,仍然在关联方向下,若 $i > 0$,则说明电流的真实方向与参考方向一致,是从 a 点流向 b 点的。因为 $u_{ab} < 0$,说明 u_{ab} 的真实方向与参考方向相反,应该是 U_b 为高电位, b 为“+”极, U_a 为低电位, a 为“-”极,如图 1-8 所示。现在正电荷从负极流向正极,不可能是正电荷团产生的电场力做功,只可能是外电场力或非电场力做功才能把正电荷推向正极,正电荷 q_0 从低电位移动到高电位,电位能增加了,可以对外做功,相当于电源,如图 1-9 所示。

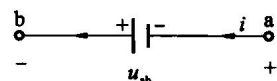


图 1-9 正电荷从低电位移向高电位,则相当于电源

在关联方向下,由 $P = ui$ 知:若 $P > 0$,则该段电路吸收功率;若 $P < 0$,则该段电路发出功率。

若 u, i 的方向为非关联方向,则计算功率时要增加一个负号,即 $P = -ui$ 。

判断其是吸收还是发出功率的方法与 ui 的关联方向相同: $P > 0$ 时,吸收功率; $P < 0$ 时,发出功率。

【例 1-1】 在图 1-10 中, $\square$ 表示该元件或支路的吸收功率, $\square$ 表示该元件或支路的发出功率,分析并求出各段支路电压的真实方向并计算其大小,已知直流电流 $I = 2 \text{ A}$ 。

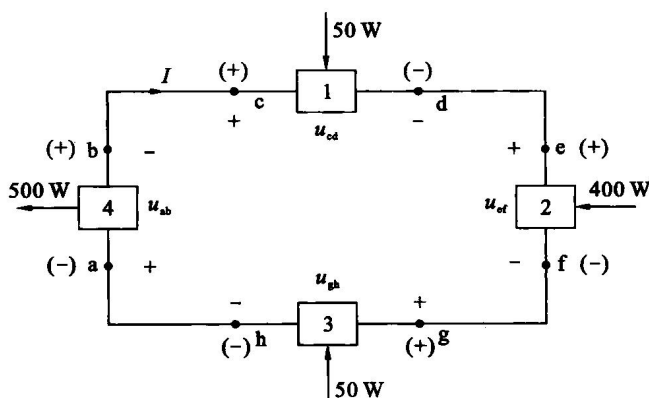


图 1-10 例 1-1 图

【解】 要知道各段支路电压的真实方向,在未计算之前应先假定其参考方向,如图 1-10 中所示,均与电流 I 的方向相关联。

cd 段为吸收功率, u_{cd} 与 I 关联方向。

由 $P_1 = u_{cd} \cdot I > 0$ 可知 $u_{cd} = \frac{+50 \text{ W}}{2 \text{ A}} = 25 \text{ V}$ 。则该段支路电压的真实方向与参考方向相同。

同理, $P_2 > 0$ 时, $u_{ef} = \frac{+400 \text{ W}}{2 \text{ A}} = 200 \text{ V}$;

$P_3 > 0$ 时, $u_{gh} = \frac{+50 \text{ W}}{2 \text{ A}} = 25 \text{ V}$ 。

其结果均与参考方向相同, 而 ab 段的 u_{ab} 与 I 方向关联, 发出功率。

由 $P_4 = u_{ab} I = -500 \text{ W}$, 可得 $u_{ab} = \frac{-500 \text{ W}}{2 \text{ A}} = -250 \text{ V}$ 。该段电压的真实方向与参考方向相反。将真实方向标于电路的外圈, 用“(+)”“(−)”表示。

1.1.2 集中参数电路的概念

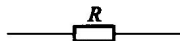
1. 电路

将用电设备与供电设备用导线联接起来形成的电流的通路, 即为电路。电路简单至手电筒电路, 复杂至超大规模集成电路。

2. 实际电路部件、理想电路元件及电路模型

一个实际电路由若干个实际部件(这些部件有时也称为元件)组成。实际部件在工作过程中往往同时产生几种物理效应, 例如灯泡点燃后会发热发光(主要性能与效应), 在灯丝的两头有电压, 故两极(头)之间有电场效应(证明灯丝两端之间有电容), 通电后在灯丝周围会产生磁场, 因而灯丝也有电感存在, 在导线上也处处都存在这三种效应, 但是一般情况下灯丝的发热效应是主要的, 后两种效应较小, 导线上的效应也较小, 故都可以略去不计。所以一个白炽灯泡只用一个电阻元件来描述它, 集中表示发热效应的电阻元件称为理想的集中参数的电阻元件, 这个理想的集中参数的电阻元件就是实际部件白炽灯泡的电路模型。

理想的集中参数的二端电阻元件用 R 表示。其电路符号如下。

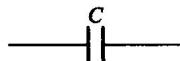


它集中表示实际部件的发热效应。

同理, 将磁场效应集中在电感元件中。理想的集中参数的二端电感元件用 L 表示。其电路符号如下。



将电场效应集中在电容元件中, 理想的集中参数的二端电容元件用 C 表示。其电路符号如下。



因此, R 、 L 、 C 既是理想的集中参数元件及参数, 也是物理现象的表征。

理想的集中参数的电路元件与表征实际的电路的模型之间的关系主要与工作条件(主要是频率)有关。例如一个实际电感线圈, 一般情况下用理想(集中参数的)的电感与电阻的串联组合表示, 但当频率较高时, 其电场效应不可忽略, 这时实际电感线圈就必须用理想(集中参数)的电感元件与电阻元件的串联组合, 再并联一个理想的集中参数的电容来表示。如图 1-11 和图 1-12 所示。



图 1-11 一般情况下线圈的模型

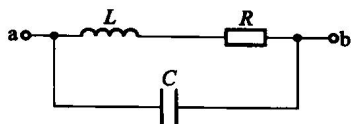


图 1-12 高频时线圈的模型

因此,一个实际部件在作分析计算时是将其用理想元件及理想元件的组合来表征的,这些理想元件的组合就称为电路模型。如上所述的一个理想电阻是白炽灯泡的电路模型;一个理想电阻与理想电感的串联组合是实际电感线圈的电路模型;一个理想电阻与理想电感的串联组合,再并联一个理想电容也是实际电感线圈的电路模型。

由理想的集中参数的电路元件组成的电路称为集中参数电路。

那么,是否所有的电路都可以用集中参数来描述呢?比如输电线上处处都有电阻、电感、电容效应,是否也可以把它们分别集中到某个元件中集中地表示,或者忽略某些效应呢?回答自然是否定的。所以集中参数电路也有一定的条件限制。

3. 集中参数电路的条件

当电路的尺寸 d 与电路工作时最高频率所对应的波长 λ 相比很小且可以忽略不计(即 $d \ll \lambda$)时,或者 $100d \ll \lambda$ 时,电路可以用集中参数表示。

例如音频电路,其最高频率假设为 $f = 25 \text{ kHz} = 25 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,由 $c = \lambda f$,可得下式。

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{25 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 12 \times 10^3 \text{ m}$$

假设电路的尺寸 $d = 0.5 \text{ m}$,可见 $d \ll \lambda$ (因为 $0.5 \text{ m} \ll 12 \times 10^3 \text{ m}$),所以音频电路一般可以用集中参数电路来描述。

一般的计算机电路的工作频率可达到 500 MHz 以上。现在就以 500 MHz 为例, $f = 500 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,电路尺寸仍假设为 0.5 m 。

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 0.6 \text{ m}$$

$\lambda = 0.6 \text{ m}$,而 $d = 0.5 \text{ m}$, λ 与 d 为同一数量级,而且数值相差很小,因此用集中参数电路来处理就很不理想,严格来说是不能用集中参数电路来处理的。

而微波电路一般的波长在 10 cm 到 1 mm 之间或更小(甚至于 nm),这时如果电路尺寸 $d = 0.5 \text{ m}$,那么,电路尺寸比波长还大很多,电路就不能用集中参数电路处理,只能用分布参数电路处理。

例如, $\lambda_1 = 0.1 \text{ m}$ 时, $f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.1 \text{ m}} = 3 \ 000 \times 10^6 \text{ s}^{-1} = 3 \ 000 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。由 $d = 0.5 \text{ m}$,得 $\frac{d}{\lambda_1} = \frac{0.5 \text{ m}}{0.1 \text{ m}} = 5$,故在电路上有 5 个完整的波。

$\lambda_2 = 10^{-3} \text{ m}$ 时, $f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{10^{-3} \text{ m}} = 300 \times 10^9 \text{ s}^{-1} = 300 \times 10^9 \text{ Hz}$ 。由 $d = 0.5 \text{ m}$,得

$\frac{d}{\lambda_2} = \frac{0.5 \text{ m}}{10^{-3} \text{ m}} = 0.5 \times 10^3 = 500$,故在工作电路上有 500 个完整的波,可见,微波电路不能用集中参数电路来描述。

1.1.3 基尔霍夫定律

1. 节点、支路、回路

1) 节点与支路

任意一个二端元件都是一条支路,两个端点都是节点,如图 1-13 所示。

任意几个二端元件的串联组合,也即一条支路,串联支路的两个对外联接的端点都是节点。串联支路内每两个元件的连接点根据需要可以算作节点,也可以不算作节点,如图 1-14 所示,若多个支路连接在一点,这一点肯定是节点,如图 1-15 所示。

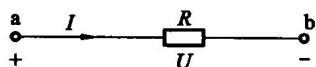


图 1-13 R 是一条支路,
 a, b 是两个节点

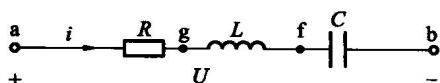


图 1-14 串联 RLC 是一条支路, a, b 是节点,
 g, f 可以算作节点,也可以不算作节点

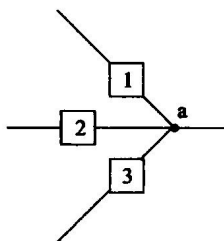


图 1-15 1、2、3 支路都连接于 a
点, a 点是节点

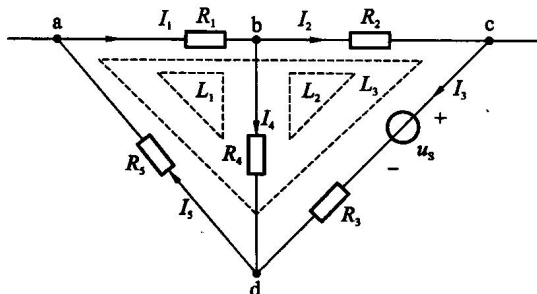


图 1-16 回路示意图

2) 回路

若干条支路组成电流的通路,从一个节点出发通过某些支路一次之后又回到该节点,则这个通路称为回路。如图 1-16 所示,由 1、4、5 组成一个回路,令其为 L_1 ;由 2、3、4 组成一个回路,令其为 L_2 ;由 1、2、3、5 组成一个回路,令其为 L_3 。

2. 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括电流定律与电压定律。

1) 基尔霍夫电流定律(KCL)

对于任一集中参数电路中的任一节点,在任一时刻流出节点的各支路电流的代数和等于零,其数学表达式如下。

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0 \quad (1-1)$$

如图 1-17 所示的电路,其中有 6 条支路,4 个节点,3 个独立回路,6 个回路。要列出各节点的支路电流代数方程,首先要将各支路电流的参考方向在图中标出来,其次需约定在 KCL 方程中背离节点(流出节点)的支路电流为正。各节点的 KCL 方程如下。

$$\text{节点①: } -I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$\text{节点②: } -I_3 + I_4 - I_6 = 0$$

$$\text{节点③: } I_1 - I_2 - I_4 - I_5 = 0$$

$$\text{节点④: } I_5 + I_6 = 0$$

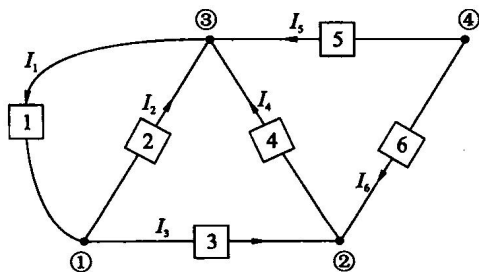


图 1-17 KCL 方程

从以上四个节点的电流方程可以看出,其中任何一个节点的电流方程都是其他三个节点的电流方程的线性组合。例如,节点④的方程就是前三个方程相加然后取负而得到的,所以在该图中全部节点有四个,但只需对其中任意三个节点列电流方程即可。如果电路的全部节点数为 n_t ,那么,只需对其中的 $n_t - 1$ 个节点列电流方程即可,令 $n = n_t - 1$ 为独立节点