

电路分析

上册

西南交通大学 李警路 主编

高等学校试用教材

中国铁道出版社

高等学校试用教材

电路分析

上册

西南交通大学 李警路 主编

长沙铁道学院 张昇平 主审

中国铁道出版社

1991年·北京

内 容 简 介

本书全面地阐述了电路分析的基本理论。全书共分十四章。上册八章，主要介绍电路的基本概念、基本定律、定理及分析方法，正弦稳态电路的分析，正弦电路的功率、谐振、互感电路、非正弦电路及三相电路，对称分量法。下册六章，主要介绍双口网络及多端元件，一阶、二阶电路的时域分析，卷积积分，频域分析，状态变量法及非线性电路。书中附有习题及参考答案。

本书除可作高等院校铁道电气化专业及其他电力专业的教材外，还可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

电路分析

上册

西南交通大学 李警路 主编

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 陆维真 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米1/32 印张：10 字数：262 千

1991年4月 第1版 第1次印刷

印数：1—3000册

ISBN 7-113-00989-1/TM·41 定价：2.60元

前 言

《电路分析》是根据1980年高等工业学校电路教学大纲编写的，为电力牵引与传动控制、铁道电气化等专业的专业技术基础课教材，讲授时数为150学时。

全书共十四章，分上、下两册出版。上册主要介绍电路的基本概念、基本定律、定理及分析方法，下册主要介绍双口网络及多端元件、电路的时域分析、频域分析、非线性电路等。

本书在编写过程中，着重强调了本课程基础知识，务使学生在建立清晰牢固的基本概念。在传统理论与近代理论的取材问题上，尽量保留了那些比较完善的、与生产实际密切相关的传统理论，适当纳入近代理论，并使两者融为一体。考虑到专业要求及现实的需要，对正弦交流电路仍赋予了足够的篇幅，并增写了对称分量法。在内容体系的安排上，尽量符合人的认识规律，先易后难，先静态后动态，循序渐进。本书不含计算机辅助分析及均匀传输线的内容。因为这些内容将在有关的课程内讲授。

全书由西南交通大学李警路主编，长沙铁道学院张昇平主审。参加编写的有：

绪论、第一、二、十、十一及十二章由西南交通大学李警路编写；第三、十三章由西南交通大学林懿珍编写；第四章由西南交通大学王秋卉编写；第五、六章由北方交通大学吴宝树编写；第七、八章由西南交通大学秦慧珍编写；第九、十四章由上海铁道学院林圭年编写。

本书在编写过程中，得到了西南交大前副校长、中国科学院学部委员曹建猷教授，国内知名电工理论、天线专家任朗教授的关怀与指导；得到了西南交大电气工程系领导及电工基础教研室的同志们的关怀与支持，对此，表示感谢。

编 者

一九九〇·五。

3AC99/07

目 录

绪 论	1
第一章 电路的基本概念及基本定律	3
第一节 电路模型	3
第二节 基本变量及参考方向	4
第三节 电路元件	6
第四节 独立电源	17
第五节 受控电源	22
第六节 基尔霍夫定律	25
第七节 电路元件的联接	32
小 结	50
习 题	51
第二章 常用网络分析法	59
第一节 支路电流法	59
第二节 节点电压法	61
第三节 网孔电流法	69
第四节 网络图论初步	77
第五节 回路分析法	83
第六节 割集分析法	85
小 结	89
习 题	90
第三章 线性电路的几个定理	98
第一节 叠加原理和互易定理	98
第二节 替代定理	106
第三节 戴维宁-诺顿定理	108
第四节 特勒根定理	114

第五节	对偶原理	118
小 结		122
习 题		122
第四章	正弦稳态电路	128
第一节	正弦量的振幅、频率与相位	128
第二节	正弦量的有效值	131
第三节	相量分析法	133
第四节	正弦稳态电路的计算	153
第五节	正弦稳态电路的功率	162
小 结		173
习 题		174
第五章	电路的谐振	180
第一节	串联谐振电路	180
第二节	串联谐振电路的频率特性与谐振曲线	185
第三节	并联谐振电路	191
小 结		196
习 题		196
第六章	具有耦合电感的电路	200
第一节	耦合电感与互感电压	200
第二节	耦合电感的串联与并联	209
第三节	含耦合电感电路的计算	212
第四节	空芯变压器	217
第五节	理想变压器与全耦合变压器	221
小 结		229
习 题		231
第七章	三相交流电路	236
第一节	三相交流电路概述	236
第二节	对称三相电动势的产生	236
第三节	三相电路的联接	238
第四节	对称三相电路的计算	245

第五节	三相电路的功率及其测量	248
第六节	负载不对称的三相电路的分析计算	255
第七节	对称分量法	260
小 结		274
习 题		275
第八章	周期性非正弦交流电路	281
第一节	周期性非正弦函数的付里叶级数	282
第二节	波形的对称性与付里叶系数的关系	284
第三节	频谱分析、频谱图、付氏级数的指数形式	290
第四节	周期性非正弦量的有效值、平均值及电 路的功率	294
第五节	周期性非正弦电路的计算	299
第六节	对称三相电路中的高次谐波	304
小 结		306
习 题		308

绪 论

电路理论有电路分析和网络综合两大分支。给出有限元件联成的电路，研究其性能，是为电路分析；根据所要求的性能进行电路设计，是为网络综合。本书属于前者的范畴，是电路分析的基础教材。

电路理论是从电磁场理论中分离并发展起来的一门独立学科。早在1827年，G. S. 欧姆创立了欧姆定律，1845年，G. 基尔霍夫创立了电路的两大基本定律——基尔霍夫电流定律和电压定律，由此确定了电路中元件性质的约束关系及元件互联规律的约束关系，为进行电路分析奠定了基本理论基础。1883年，L. C. 戴维宁提出了简化电路的有力工具——戴维宁定理；1894年，C. P. 斯坦麦兹成功地把复数运用于正弦稳态电路的分析中；还有P. S. 拉普拉斯的拉普拉斯变换法和O. 海维赛德的阻抗概念等等，所有这些成果构成了经典的电路理论，使其发展成为一门独立的学科。

本世纪初至40年代，由于电子管的出现及广播通讯事业的发展，电路理论进一步成熟。1931年，O. 布隆在网络综合方面的正实函数概念，R. 福斯特、W. 考尔的网络综合法，1949年，巴特-达芬的无变压器综合法等，标志着电路理论中分析与综合两大分支的形成。

50至60年代期间，随着科学技术的迅速发展，电路理论得到了进一步的更新。图论和奇异函数的引入，阶跃响应和冲激响应的提出，网络函数、零点及极点概念的引入等，既丰富了电路理论本身，又促进了控制技术与自动化技术的发展。美国学者E. A. Guillemin在这方面做出了卓越的贡献。

60年代以后，特别是近二十年来，电视、激光、空间技

术、尤其是计算机与集成电路的发展与广泛应用，促使电路理论经历了重大变革：从原来的线性、非时变、无源、双向元件的RLC电路理论发展到非线性、时变、有源、非互易的电路理论。新概念、新理论、新方法、新器件不断涌现，形成了当前的近代电路理论。

计算机的冲击，改变了电路理论的固定模式。例如，计算机要求人们用系统的方法列写电路方程，而求解则是数值化的，这就使得图论、矩阵、算法等在电路理论中占有了重要的地位。同时，计算机也改变了“解”的含义，使“解析解”转向“数值解”。对非线性电路难以求得的闭式解可以用数值法求得其解答。

集成电路对电路理论同样产生着巨大的影响。任何一个大规模及超大规模的集成电路，都是由成千上万个电子元件组成的系统，这就迫使人们建立起器件、电路与系统紧密相关的统一的观点。

同时，电路理论的发展及其取得的丰硕成果又极大地推动了电子技术、通讯技术、自动化技术、计算机、电力工业以及众多领域的技术的发展。比如，没有成熟的滤波器与综合理论，多路通讯几乎不可能有今天的规模和成就，没有高度发展的网络理论也就不会有今天的集成电路。

电路理论是一门高度数学化、模型化且与生产紧密相关的工程学科。这本教材是电路分析的基础教材。学习这门课能够为研究更高深的电路理论打下基础，为学习专业技术提供便利条件。

第一章 电路的基本概念及基本定律

第一节 电路模型

电路分析是研究给定电路（包括电路的结构及元件的性质）的基本变量之间（ u 、 i 、 q 及 ψ ）的相互关系及所遵循的定律和法则，从而对电路的性能有一明确的揭示。

电路分析是通过实际电路的模型进行的。实际电路是一些实际电气器件按一定规则联接成的电路。例如，手电筒的实际电路是电池、开关、手电筒的铁皮及电珠联接而成的。电气化铁道的实际电路为接触网、受电弓、牵引电动机及钢轨构成的电路。这样的电路是不能用来直接分析计算的，必须把它们转化成足以表征其电磁性能的电路模型才行。电路模型是由理想的电路元件取代每一个实际电气器件而构成的电路，换言之，电路模型是由理想电路元件按一定的规则联接而成的电路。

电路元件是从电磁角度对实际电气器件进行抽象化、理想化以及近似化而形成的足以表征实际器件的主要电磁性能的元件。尽管实际电气器件的种类繁多形形色色，但理想的电路元件却是屈指可数的。虽说电气器件是用理想电路元件近似地表征的，但是，每一个电路元件的定义却是严格的，它们一般是用数学来定义的。

本书所讨论的电路均以集中参数电路为准，也就是说电路中的每个元件不具备实际的尺寸，从二端元件的一端流入的电流在任何时刻都等于从另一端流出的电流。而且，两端的电压具有确切的量值。一个实际的电路是否可以用集中参数电路模型来表示，关键在于这个电路的尺寸（设为 d ）是否远远小于电路运行频率所对应的波长（设为 λ ），即是否满足 $d \ll \lambda$ 。如果满足这个

条件, 则这个电路可以用集中参数电路来模拟。例如, 设音频电路的最高频率为 $f = 20\text{kHz}$, 电磁波的传播速度为 $C = 3 \times 10^8\text{m/s}$, 则波长 $\lambda = C/f = 3 \times 10^8 / 20 \times 10^3 = 15\text{km}$ 。一般音频电路远小于这个尺寸, 因此, 这样的电路可以使用集中参数电路模型。但是, 对于长距离输电线路 (例如长达1000km以上), 虽然50Hz下的波长为 $\lambda = 3 \times 10^8 / 50 = 6000\text{km}$ 。由于电路的实际尺寸与波长的尺寸具有同一数量级, 所以, 这样的电路是不宜使用集中参数电路模型来模拟的, 而应该使用分布参数电路模型。分布参数电路的电压、电流变量不仅与时间变量有关, 而且还与空间变量 (线路长度) 有关。

第二节 基本变量及参考方向

在电路分析中, 人们经常用这几个变量 $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $q(t)$ 、 $\psi(t)$ 以及 $p(t)$ 和 $w(t)$ 来表达电路中的基本物理量 电压、电流、电荷、磁链以及功率和能量, 并通过这些变量来揭示电路的各种性能。这些物理量的含义已在普通物理学中讲解清楚, 在这里仅给出它们之间的关系

$$i(t) = \frac{d}{dt} q(t) \quad (1-1a)$$

$$\text{或} \quad q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (1-1b)$$

$$u(t) = \frac{d}{dt} \psi(t) \quad (1-2a)$$

$$\text{或} \quad \psi(t) = \int_{-\infty}^t u(t) dt \quad (1-2b)$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1-3)$$

$$\text{及} \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt = \int_{-\infty}^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (1-4)$$

在以上各变量中, 电荷的单位名称为库仑, 符号为 C; 电流的单位名称为安培, 符号为 A; 电压的单位名称为伏特, 符号为 V;

磁链的单位名称为韦伯，符号为 Wb ；功率的单位名称为瓦特，符号为 W ；能量的单位名称为焦耳，符号为 J 。在电力系统中，计量能量的单位最常用的是千瓦·小时，符号为 $kW \cdot h$ （曾经叫作度）。

从以上的公式中可以清楚地看出，只要知道了电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ ，就可以方便地求出其他变量。所以，电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 是一对基本变量。同理，当知道了电荷 $q(t)$ 和磁链 $\psi(t)$ 以后，也可以方便地求出其他变量。电荷 $q(t)$ 和磁链 $\psi(t)$ 在某些情况下（例如在非线性电路中），在描述电路的性能方面较 $u(t)$ 和 $i(t)$ 更为优越。所以，电荷 $q(t)$ 和磁链 $\psi(t)$ 是电路分析中的另一对基本变量。

电路中的各个物理量都具有一定的“方向”。例如，电流的流向，电压的极性，电荷的正负等等。因此，在电路分析中这些变量的方向是不容忽视的。如果其中某个变量的“方向”弄错，分析的结果将是错误的。在简单的电路中，在分析之前各个变量的“方向”是可以判断出来的。但是，在复杂的电路中，这些变量的“方向”事先无法辨出，因此，就需要一种假定的“方向”，即所谓参考方向。

某一变量的参考方向是一种任意假定的方向。根据这个方向进行计算，如果算出的结果为“+”时，说明参考方向与真实的方向是一致的；如果算出的结果为“-”时，说明参考方向与真实的方向是相反的。图1-1为电路中某一二端元件，流过该元件的电流 i 的真实方向是不知道的，现假定 i 的方向如图中箭头所示，这个由 A 指向 B 的方向就是 i 的参考方向。如果经计算 i 的数值为“+”时，则箭头的指向就是 i 的真实方向，如果为“-”时，则箭头的方向与真实的方向相反。同理，元件两端的电压 u 的参考方向（更确切些是参考极性）是用假定的一对“+”、“-”号来表示的，且假设 A 端为“+”， B 端为

* 时变电流 $i(t)$ 及时变电压 $u(t)$ 等也常用小写字母 i 及 u 表示。

“-”，即 A 端的电位高于 B 端的电位。不标明参考方向的电压 u 及电流 i 的正、负是没有任何意义的。

一个电路中的电流的参考方向与电压的参考极性本是可以独立假定的。但是，为了方便起见，常使电流的参考方向与电压的参考极性一致起来，即电流的方向是从标明电压的“+”端流入而从“-”端流出，如图 1—1 所示。这样假设的参考方向称为关联参考方向。

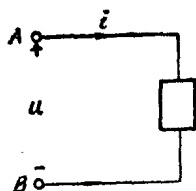


图 1—1 电路中的一个二端元件

在电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 取关联参考方向时（如图 1—1 所示），输入元件的功率 $p(t)$ 的计算如式（1—3）所示，即 $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ 。如果 $p(t) > 0$ ，说明元件是吸收功率的；如果 $p(t) < 0$ ，元件吸收负的功率，即元件是释放功率的。如果 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的参考方向不是关联的，仍应用式（1—3）计算功率，则应在公式中加以“-”号，即 $p(t) = -u(t) \cdot i(t)$ 。图 1—1 中的二端元件如果是一个电源，则 $i(t)$ 与 $u(t)$ 的参考方向常采用非关联参考方向。

参考方向在电路分析中是一个重要的概念。虽说简单，但很容易出错。本书的定律、定理、计算公式都是建立在参考方向确定的基础上的。

第三节 电路元件

电路元件是反映实际电气器件电磁过程的理想化元件。它们均有严格的定义，而且每个元件均联系着不同的基本变量。电路元件分二端的、多端的、线性的、非线性的、时变的及非时变的等等。本书所讨论的主要是线性非时变元件，第十四章将讨论非线性元件。

一、电阻元件

定义一个线性非时变电阻是根据欧姆定律进行的。图 1—2 (a) 所示为一二端元件，其两端的电压 $u(t)$ 与通过它的电流 $i(t)$ 采取关联参考方向。如果电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 满足欧姆定律

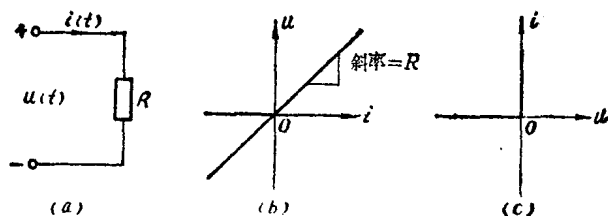


图 1—2 二端电阻元件的符号及其伏-安特性

$$u(t) = Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = Gu(t) \quad (1-5)$$

即 $u(t)$ 与 $i(t)$ 在任何时刻都成正比关系，则这个比例常数 R 就定义为线性非时变电阻。 R 的特性不随时间而变，不因电压、电流的大小而变。电阻 R 的倒数 $G = 1/R$ 称为电导。

电阻的单位名称为欧姆，符号为 Ω ；电导的单位名称为西门子，符号为 S 。

式 (1—5) 是欧姆定律的表达式，也是线性非时变电阻 R 的伏-安特性。它在 $i-u$ 平面上是通过原点的一条直线，其斜率为电阻值 R 。当电阻值 $R = 0$ 时，特性曲线与 i 轴重合。此时不论 i 为何值，端电压 u 总为零，是谓“短路”。当电阻值 $R = \infty$ 时，特性曲线与 u 轴重合。此时不论 u 为何值，电流 i 总为零，是谓“开路”。凡伏-安特性不是过原点的一条直线的电阻称为非线性电阻。图 1—2(c) 所示的特性曲线是理想二极管的伏-安特性，它是属于非线性电阻之类的元件。该类元件将在第十四章详细讨

论。

由式(1-3)可知,输入电阻的功率为

$$p=ui$$

由式(1-5),有

$$p=Ri^2=Gu^2 \quad (1-6)$$

由于 R 为正值常数(当然 G 也是),而 i^2 与 u^2 又恒为正值,所以输入电阻 R 的功率 p 永为正值,也就是说 R 为一耗能元件。

【例1-1】设图1-2(a)电路中的电阻 $R=10\Omega$,两端所加的电压 u 及通过的电流 i 的参考方向采取关联参考方向,如图所示。(a)如果所加电压为一直流电压,其值为 $U^*=-10V$,求通过 R 的电流 I 及消耗在 R 的功率 P ; (b)如果 R 吸收的功率为 $100W$,求外加电压 U 的大小; (c)如果外加电压为 $u=10\sin 314t(V)$,求通过 R 的电流 i , R 吸收的瞬时功率 p 及平均功率 P 。

【解】

$$(a) R=10\Omega, U=-10V$$

由式(1-5),有

$$I=\frac{U}{R}=\frac{-10}{10}=-1A.$$

外加电压的实际极性与参考极性相反,从而电流的实际方向也与参考方向相反。

R 消耗的功率为

$$P=UI=(-10)(-1)=10W$$

仍按原参考方向计算,注意电压、电流前的“-”号不要丢掉。

(b) R 吸收的功率为 $P=100W$ 时,根据式(1-6),有

$$U=\pm\sqrt{\frac{P}{G}}=\pm\sqrt{100\times 10}=\pm 31.6V$$

电压前的“ $\pm$ ”号说明不论所加电压的极性与参考极性相同还是相反, R 吸收的功率总是 $100W$ 。

* 凡恒定的电压、恒定的电流及恒定的功率本书用大写的字母 U 、 I 及 P 表示,凡时变的电压、电流及功率用小写字母 u 、 i 及 p 表示。

(c) 所加电压为 $u = 10 \sin 314t$ (V) 时, 按欧姆定律有

$$i = \frac{u}{R} = \frac{10 \sin 314t}{10} = \sin 314t \text{ (A)}$$

瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = 10 \sin 314t \cdot \sin 314t \\ &= 10 \sin^2 314t = 5 (1 - \cos 2 \times 314t) \text{ (W)} \end{aligned}$$

这个结果说明, 所加电压虽按正弦函数变化, 其值时正时负, 但是, 电阻 R 所吸收的瞬时功率则永远为正, 无负值的出现, 表明电阻 R 为一耗能元件。

平均功率为对瞬时功率取平均。 p 为一周期性的时变函数, 设其周期为 T 。则平均功率

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T 5(1 - \cos 2 \times 314t) dt = 5W$$

二、电容元件

电容元件是实际电容器的理想化模型, 它是个贮存电场能量的元件, 它的图形符号如图 1—3 (a) 所示。当电容器两端加上电压 $u(t)$, 两极板就有积存的电荷 $q(t)$, $q(t)$ 与 $u(t)$ 之间存在着正比关系

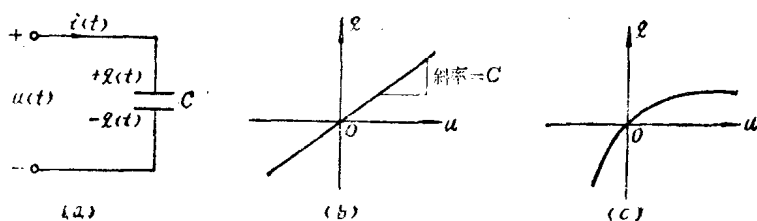


图 1—8 电容元件的符号及其特性

$$q(t) = Cu(t) \quad (1-7)$$

式中的比例常数 C 就定义为线性非时变电容。当电荷 $q(t)$ 的单位为库, 电压 $u(t)$ 的单位为伏时, 则电容 C 的单位名称为法[拉], 符号为 F。在实际应用中, 以 F 作为电容的单位过大, 因而, 多

采用 μF （微法），及 pF （皮法）为计量单位。

式（1—7）表达了一个线性非时变电容器库-伏特性，它在 u - q 直角坐标系中是通过原点的一条直线[图1—3(b)]，直线的斜率就是 C 值的大小。凡特性曲线在 u - q 平面上不是过原点的直线而是一条曲线的电容称为非线性电容。图1—3(c)所示为集成电路中常用的非线性MOS电容器的特性曲线。

根据式（1—1a），对式（1—7）求导，有

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1-8a)$$

该式表明了线性非时变电容器 C 的伏-安关系，其中电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 采取了关联参考方向。如果 $u(t)$ 与 $i(t)$ 采取非关联参考方向，则式中应加“-”号，即

$$i(t) = -C \frac{du(t)}{dt} \quad (1-8b)$$

式（1—8）说明，当 C 一定时通过它的电流取决于加在它上面的电压的变化率，而与电压的大小无关。如果所加电压的变化率为零，即 $du(t)/dt = 0$ （例如直流电压），则没有电流通过，即 $i(t) = 0$ 。因此，对于直流来说，电容相当于开路。

现在根据图1—3a的电路进一步研究电容的端电压、电流及电荷的关系。由式（1—1b），积存在电容 C 的电荷 $q(t)$ 为

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$$

该式的积分上限 t 表明在 t 时刻积存在电容 C 上的电荷，积分下限 $-\infty$ 表明计算电容 t 时刻的电荷必须考虑电容过去积存的电荷。如果取 $\tau = 0$ 为计时的起点，则上式可改写成

$$\begin{aligned} q(t) &= \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau + \int_0^t i(\tau) d\tau \\ &= q(0) + \int_0^t i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中 $q(0) = \int_{-\infty}^0 i(\tau) d\tau$ 为电容 C 的原有电荷或说电容电荷的初始值。该式说明电容 C 在 t 时刻的电荷除了在 $[0, t]$ 区间所积存