

高等学校试用教材

电 路 分 析 基 础

北京邮电学院电工教研室 编

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书比较系统地、全面地讨论了电路中的基本概念、基本理论和基本分析计算方法。

全书共分十章。第一章至第五章为电阻电路的分析：内容有电路的基本概念和基本定律，简单电阻电路（包括非线性电阻电路）的分析，线性网络的一般分析方法和拓扑分析法以及网络定理。第六章至第七章为一阶和二阶电路的分析；第八章至第十章为正弦稳态电路的分析，电路的频率特性、互感电路和变压器。各章节配有较丰富的例题和习题。

本书可作为电信、无线电技术、计算机和自动控制等专业教学用书，也可供有关科技人员参考

高等学校试用教材

电 路 分 析 基 础

北京邮电学院电工教研室 编

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

•

开本：850×1168 1/32 1984年11月第一版

印张：19 4/32 页数：306 1984年11月北京第一次印刷

字数：508 千字

印数：1—15,000 册

统一书号：15045·总2944—无6302

定价：2.35元

目 录

第一章 电路模型和克希荷夫定律	1
§ 1-1 电路和集中参数电路	1
§ 1-2 电路分析的变量	5
§ 1-3 克希荷夫定律	10
习题	18
第二章 简单电阻电路的分析	22
§ 2-1 电源元件和电阻元件	22
§ 2-2 电阻串联、并联和混联电路	30
§ 2-3 星形电路与三角形电路的等效变换	38
§ 2-4 电源的两种电路模型	43
§ 2-5 电源向负载电阻供出最大功率的条件	48
§ 2-6 受控电源	50
§ 2-7 简单非线性电阻电路的分析	55
习题	60
第三章 线性网络的一般分析方法	80
§ 3-1 网络克希荷夫定律方程	81
§ 3-2 支路电流法	88
§ 3-3 克希荷夫定律方程的独立性	93
§ 3-4 独立变量的选取	100
§ 3-5 结点电压法	106
§ 3-6 网孔电流法	114
§ 3-7 对偶特性和对偶网络	121
习题	125
*第四章 线性网络的拓扑分析法	135
§ 4-1 关联矩阵和结点分析法	

§ 4-2	网孔矩阵和网孔分析法	156
§ 4-3	基本回路矩阵和回路分析法	168
§ 4-4	基本割集矩阵和割集分析法	174
习题		183
第五章	网络定理	189
§ 5-1	迭加定理	189
§ 5-2	替代定理	194
§ 5-3	戴维南定理和诺顿定理	196
§ 5-4	互易定理	205
§ 5-5	特勒根定理	209
§ 5-6	网络灵敏度	214
习题		221
第六章	一阶电路的分析	229
§ 6-1	电容元件	230
§ 6-2	电感元件	239
§ 6-3	一阶电路的零输入响应	247
§ 6-4	一阶电路的零状态响应	255
§ 6-5	一阶电路的全响应	259
§ 6-6	恒定激励一阶电路的三要素公式	261
§ 6-7	指数函数与正弦函数激励一阶电路的分析	268
§ 6-8	微分电路与积分电路	273
§ 6-9	突变情况的分析	283
§ 6-10	阶跃函数与冲激函数	290
§ 6-11	一阶电路的零输入零状态公式	301
*§ 6-12	一阶电路的冲激响应与阶跃响应	307
习题		315
第七章	二阶电路的分析	331
§ 7-1	RLC 电路的零输入响应	331
§ 7-2	RLC 电路的零状态响应	341

*§ 7-3	RLC 电路的冲激响应	345
§ 7-4	瞬态分析的算符法	348
	习题	354
第八章	正弦稳态电路的分析	358
§ 8-1	周期信号	359
§ 8-2	正弦信号的基本概念	363
§ 8-3	正弦信号的相量表示法	368
§ 8-4	基本电路元件的正弦稳态特性	376
§ 8-5	欧姆定律与克希荷夫定律的相量形式——相量法	388
§ 8-6	RLC 电路、阻抗和导纳	395
§ 8-7	阻抗和导纳的串并联电路	408
§ 8-8	线性网络的分析方法和网络定理在正弦稳态中的推广	413
§ 8-9	正弦稳态电路的功率	424
§ 8-10	三相电路	434
§ 8-11	非正弦周期电路的分析与计算	444
§ 8-12	实际器件的模型	452
	习题	460
第九章	电路的频率特性	479
§ 9-1	RC 电路的频率特性	479
§ 9-2	串联谐振回路	494
§ 9-3	并联谐振回路	509
§ 9-4	双电感回路和双电容回路	521
	习题	525
第十章	互感电路和变压器	533
§ 10-1	互感元件	533
§ 10-2	互感电路的分析	540
§ 10-3	互感化除法	555
§ 10-4	互感电路的引入阻抗	559

§ 10-5 理想变压器.....	564
§ 10-6 全耦合变压器.....	576
§ 10-7 变压器模型.....	583
附注：全耦合变压器的激磁电感，自感与互感.....	588
习题.....	590

第一章 电路模型和克希荷夫定律

在通信、自动控制以及计算机等电子设备中，广泛应用电路作为信号处理器。通常，采用理想化的模型来研究电路。为了便于讨论电路的性能，需要确定能表征电路状态的一组变量。在电路的各变量之间存在着一定的约束关系。

本章先介绍用集中参数表示的电路模型——集中参数电路，再讨论电路分析的变量。最后介绍克希荷夫定律，它是今后讨论集中参数电路各种分析方法的理论基础。

§ 1-1 电路和集中参数电路

1-1-1 电路

电路由器件及联接导线组成，它提供了电流流通的途径。在通信、自动控制以及计算机等电子设备中，为了按照预定的要求对电信号（简称信号）进行处理，需要采用不同类型的电路来完成各种任务。在这些设备中，电路的一个重要功能就是将输入信号（也称为激励）经过变换，处理成为所需要的输出信号（也称为响应）。以常见的如图 1-1-1 所示的收音机为例，由图可见，一台简单收音机是由输入电路（包括天线及调谐电路）、检波电路、放大电路以及扬声器组成。

输入电路的功能是接收由各个发射台发出的不同信号，并从中选择出所需要的信号和除去其他不需要的信号；检波电路的功能是将调谐电路选择出来的高频信号作适当处理，从中取出发射台所传送的音频信号；由于音频信号很微弱，因此在送入扬声器之前，还

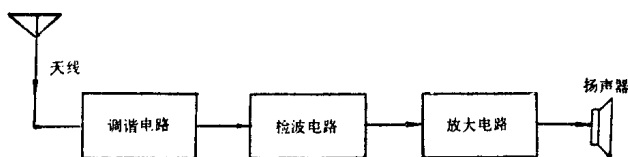


图 1-1-1 简单收音机原理图

需要经过放大电路加以放大。由此可见，电路的作用就是将激励信号处理成为所需要的响应。

电路的另一重要功能就是伴随电流在电路中通流，进行着电能和非电能的转换以及电能的传输、分配和贮存的过程。这时，电路可看成由电源、负载和联接导线三部分组成。一般说来，电源将非电能转换成电能供给电路，负载吸收电能并贮存起来或者转换成非电能，而联接导线则起着传输和分配电能的作用。

1-1-2 集中参数电路

在大多数科学领域中，经常使用理想化的模型来描述所研究的物理系统。一个具有实用价值的理想化模型，并不需要把系统中所发生的一切物理过程不分主次地一一表示出来。但是，根据这个模型进行分析的结果，在所要求的精度范围内必须与物理系统的实际测量结果相符合。例如，在经典力学中，为了分析机械系统，采用质点作为小物体的模型，刚体作为实际物体的模型。质点定义为具有质量、在空间占有确定位置但体积为无限小的点；刚体则定义为由无限多个质点组成，不管受到多大外力的作用，其上任何两质点间的距离不改变。严格地说，客观世界并不存在没有体积的质点和没有弹性的刚体，但是，利用这种抽象模型来分析机械系统，却能得到令人满意的结果。

电路理论同样也是建立在模型概念的基础上。为了分析和设计实际电路，通常将它理想化，建立电路的模型。实际电路是由电阻器、晶体管、电子管、电容器、电感线圈和变压器等器件组成，

将这些元器件分别采用适当的模型替代后，便可得到电路的模型。

实际电路中，信号源是电路的外加激励，一般情况下，是随时间变化的，并向电路供出电能。信号源的这一物理特性，可用理想化模型，即第二章第一节介绍的源电压和源电流来表征。电路在传输和分配电能的过程中，伴随着电能的贮存和消耗，这些效应可采用第二章第一节和第六章第一、二节介绍的三种理想元件来表征，即表征消耗电能并转变成非电能的电阻元件；表征存在电场贮存电场能量的电容元件以及表征存在磁场贮存磁场能量的电感元件。这三种理想元件是电路的基本元件模型，具有确切的数学特性，所表征的电特性可以分别用电阻、电容和电感三个参数表示。理想元件都是抽象的模型，它们没有体积，特性集中在空间的一点上，称为集中参数元件。每个集中参数元件具有两个端子，也称为二端元件。

建立了集中参数元件的概念，我们就可以用它们表征或近似表征某些器件。例如，线绕电阻器的电阻效应是沿着整个导线分布的，如果电阻器的电容和电感效应能够忽略不计的话，就可以用一个电阻元件来表征这个电阻器。电阻元件集中在一个极小的体积里，与电路的其余部分用没有电阻的理想导线相联接。同样，电感线圈中电阻效应和电感效应两者不可分离地混合在一起，我们可以用两个完全分开的电阻元件和电感元件来表征。本书将根据讨论问题的需要，陆续介绍一些常用器件的模型及其性能。

实际电路中的每个器件用理想元件表征或近似表征后，就得到电路的模型。这个模型称为集中参数电路。集中参数电路就是将有限个二端元件按照各种不同的联接方式组成的电路模型。每个二端元件就是一条支路，元件的端点称为结点^{*}，因此集中参数电路是支路和结点的集合。图 1-1-2 是具有 7 条支路和 5 个结点的集中参数

^{*} 也可将相互串联或并联的元件看成一条支路，而将这种支路的两个端点称为结点。这时，电路的支路数和结点数均将减少。

电路。为了便于讨论，可以将支路和结点分别编号。例如图 1-1-2 中，支路按 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 编号，结点按 ①, ②, ③, ④, ⑤, 编号。

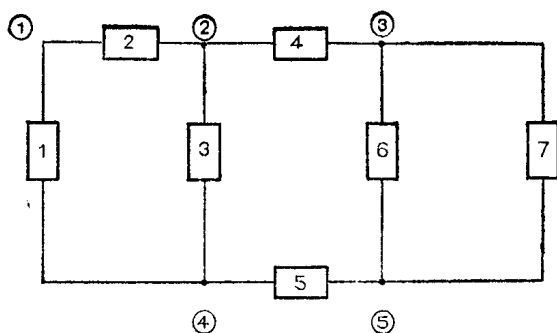


图 1-1-2 集中参数电路

用集中参数电路模拟实际电路是有条件的，条件就是整个电路的实际尺寸足够小，同时，外加激励随时间变化的速率不是太大。在满足这些条件的情况下，当外加激励在数值上发生变化瞬间，激励产生的效应已经到达整个电路。可以认为，电效应在电路的所有部分同时发生。因此，集中参数电路的概念意味着电效应的传播速度为无限大。

如果电路的实际尺寸非常大，例如几百公里长的传输线，或者电路的实际尺寸虽然不大，但激励的变化却非常快，这时，尽管电效应的传播速度很高，但电路中远离激励源处的电效应总是滞后于靠近激励源处的电效应。用电磁场理论的术语讲，就是实际电路的尺寸与激励的波长可以比拟。在这种条件下，实际电路就不能用集中参数电路而必须改用分布参数电路来模拟，或者应用电磁场理论来进行分析。

本书只讨论集中参数电路的有关理论和分析方法。今后提到“电路”一词时，除特别说明外，一般均指以集中参数表示的电路模型。

§ 1-2 电路分析的变量

集中参数电路是支路和结点的集合。支路既可包含电阻、电容或电感等无源二端元件,也可包含源电压或源电流等有源二端元件。电路在有源元件激励下,支路中有电荷移动形成支路电流;结点具有确定的电位,形成支路电压。分析电路问题时,通常已知的是支路的特性及其相互联接,待求的是支路电流和支路电压。支路电流和支路电压称为电路分析的变量,现分别讨论如下。

1-2-1 支路电流及其参考方向

图 1-2-1 所示系电路的任一支路。电荷由支路的一端流入,从另一端流出。单位时间内流过支路的电荷量称为支路电流。一般情况下,电流是随时间变化的。我们采用小写英文字母表示随时间变化的物理量。现设流过图 1-2-1 所示支路的电荷量为 q , 则支路电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

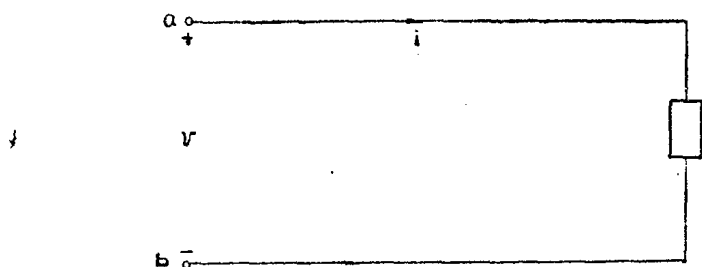


图 1-2-1 支路的电流和电压

习惯上规定正电荷移动的方向为电流的真实方向。

式(1-2-1)表明,当 dq 为正时, i 为正值;当 dq 为负时, i 为负值。显然,电流 i 的值可正可负,是一个代数量。为了说明支路

电流在不同时刻的真实方向，必须将电流的代数量与支路电流的参考方向*结合起来。参考方向可以任意选定，在电路图上用箭头表示，如图 1-2-1 中所示；也可以不画箭头，用下标文字表示，例如 i_{ab} 表示电流 i 的参考方向是由支路的 a 点指向 b 点。参考方向一经选定，在分析电路的过程中就不再变动。式 (1-2-1) 与选定的电流参考方向结合起来，就能说明电流的真实方向。若 i 为正值，表明电流的真实方向与选定的参考方向一致；若 i 为负值，说明电流的真实方向与参考方向相反。今后，在分析电路时，总是先选定支路电流的参考方向，然后根据这个参考方向去分析计算，所得结果用代数量表示。

在国际单位制(SI)中，电荷量 q ，电流 i 以及时间 t 的单位分别为库仑(简称库，用符号 C 表示)、安培(简称安，用符号 A 表示)和秒(用符号 s 表示)。1 安 = 1 库/秒。

练 习 题

1-1 在支路中沿 a 点到 b 点的方向上每秒钟流过 1 毫库(mc)的正电荷量，如果假定电流的参考方向是从 a 到 b ，求电流的值；如果假定电流的参考方向是从 b 到 a ，电流的值又是多少？如果流过该支路的是负电荷量，则电流在上述两种假定参考方向的情况下，其值各是多少？

1-2 图 1-2-2 中电流 i_1 和 i_2 之间有什么关系？如果 $i_1 = -3$ A，问 i_2 是多少？

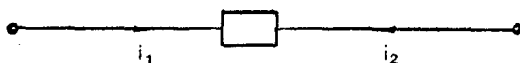


图 1-2-2 练习题 1-2 的电路

* 参考方向也称为正方向。

1-2-2 支路电压及其参考方向

电荷通过图 1-2-1 所示支路，如果支路两端存在电位差，电荷与支路间会发生电能的交换。支路的 a 端电位高于 b 端电位，正电荷从 a 端移到 b 端，电场力作功，电荷失去电位能，这部分电能被支路所吸收；支路的 a 端电位低于 b 端电位，正电荷从 a 端移到 b 端，外力做功，电荷获得电位能，这部分电能是由支路供出的。

支路电压就是支路两端沿电位降落方向电位差，数值上等于单位正电荷从支路的高电位端移到低电位端时电场力所作的功，真实极性是从高电位端指向低电位端。如果正电荷量 dq 由支路的 a 端移到 b 端时电场力所作的功为 $d\omega$ ，则支路电压

$$v = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2-2)$$

上式表明，若单位正电荷从 a 端移到 b 端，电场力作功， v 为正值；若外力做功，则 v 为负值。由此可见，支路电压也是一个代数量。为了说明支路电压的真实极性，也需要选定其参考极性。参考极性在电路图上用“+”、“-”符号表示，“+”表示高电位端，“-”表示低电位端，如图 1-2-1 所示；或者用下标文字表示，例如 v_{ab} 。对选定的参考极性而言，式 (1-2-2) 中支路电压 v 为正值，说明其真实极性与参考极性一致； v 为负值，说明其真实极性与参考极性相反。

在(SI)单位制中，电荷量 q 、电功 w 和支路电压 v 的单位分别为库仑(C)、焦耳(简称焦，用符号 J 表示)和伏特(简称伏，用符号 V 表示)。1 伏 = 1 焦/库。

在电路分析中，通常既需选定支路电流的参考方向，也需选定支路电压的参考极性。原则上讲，两者可以任意选定，彼此独立无关。但是，为了分析上的便利和统一，习惯上常将同一支路的电流参考方向和电压参考极性选得一致，即电流参考方向选定为由支路电压参考极性的“+”端进入，从“-”端出来，如图 1-2-1 所示。这

样选定的参考方向和参考极性，称为结合参考方向*。在电路图上，可以只标出支路电流的参考方向或支路电压的参考极性，不必将两者同时标出。

练 习 题

1-3 1 库仑电荷量在支路中沿 a 到 b 的方向移动时，其电位能变化了 6 焦耳，求下列各情况下的电压 v_{ab} ，(1) 移动的是正电荷，电位能是减少；(2) 移动的是正电荷，电位能是增加；(3) 移动的是负电荷，电位能是减少；(4) 移动的是负电荷，电位能是增加。

1-4 图 1-2-3 中，如果 $v_1 = 8 \text{ V}$ ，问 v_2 等于多少？

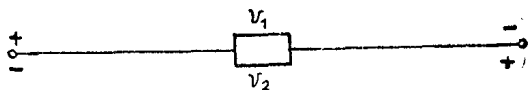


图 1-2-3 练习题 1-4 的电路

1-2-3 支路吸收功率

功率是电路分析中常常用到的另一个物理量。支路吸收功率就是支路在单位时间内吸收的电能。当支路在 dt 时间内吸收的电能为 dw 时，支路吸收的功率是

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-2-3)$$

已经知道，支路电压是单位正电荷由高电位端移到低电位端电场力所作的功，支路电流是单位时间内流过支路的电荷量。在结合参考方向条件下，任一支路的电压和电流乘积就是这个支路吸收的功率。将式(1-2-1)和(1-2-2)代入式(1-2-3)，可得支路吸收功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = v \cdot i \quad (1-2-4)$$

* 有的书上称为关联参考方向

式中 p 为正值, 表明支路确实吸收或消耗功率。支路在单位时间内吸收的电能不能消灭, 而是转化成热能、光能或其它形式的能量, 或者暂时储存在支路中; p 为负值, 则表明支路不是吸收而是向电路其余部分供出功率。

应当注意, 如果支路电压和电流不取结合参考方向, 则支路吸收功率应为

$$p = -v \cdot i$$

在(SI)单位制中, 支路吸收功率 p 的单位为瓦特(简称瓦, 用符号W表示); v 和 i 的单位分别为伏和安。1 瓦=1 伏·安。

伏(V)、安(A)和瓦(W)分别是电压、电流和功率的主单位。由于工程上物理量的数值差别很大, 我们常在其主单位前冠以表 1-1 所示符号, 或者乘以因数 10^n 来表示数量级。例如, 5 毫伏(mV)= 5×10^{-3} 伏(V); 8 微安(μA)= 8×10^{-6} 安(A); 3 千瓦(kW)= 3×10^3 瓦(W)等等。

表 1-1

国际制符号	中 文	因 数	国际制符号	中 文	因 数
T	太	10^{12}	m	毫	10^{-3}
G	吉	10^9	μ	微	10^{-6}
M	兆	10^6	n	纳	10^{-9}
K	千	10^3	p	皮	10^{-12}

练 习 题

1-5 0.1 A 电流自某支路的 a 端流入, 从 b 端流出, 求下列情况下支路吸收的功率: (1) a 端电位比 b 端高 10 V; (2) b 端电位比 a 端高 10 V; (3) a 端电位比 b 端高 -10 V。

§ 1-3 克希荷夫定律

电路的性能取决于本身的几何结构及支路特性，与支路在空间的位置无关。在电路图中，支路可以任意放置，联接线是理想的，其长短和形状也无关紧要。因此，图 1-3-1(a)的电路也可以画成同图(b)的电路，虽然两者的画法不同，但其几何结构却是相同的。

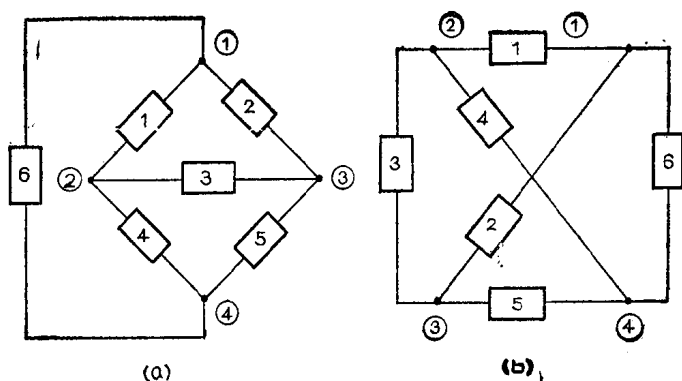


图 1-3-1 两个几何结构相同的电路

克希荷夫总结了集中参数电路的基本规律，于 1848 年提出了克希荷夫电流定律(简写成 KCL)和电压定律(简写成 KVL)，也称克希荷夫第一定律和第二定律。

1-3-1 克希荷夫电流定律(KCL)

支路电流就是单位时间内流过该支路的电荷量。根据电荷守恒原理，电荷既不能无中生有，也不能从有到无。因此，在集中参数电路中，任何瞬间进入任一结点的电荷必须立即离开，不能在结点处储存起来，与结点相联的各支路中，任一瞬间从结点流出的电流必定等于流入的电流。例如，对图 1-3-2 电路中结点 a 可写出

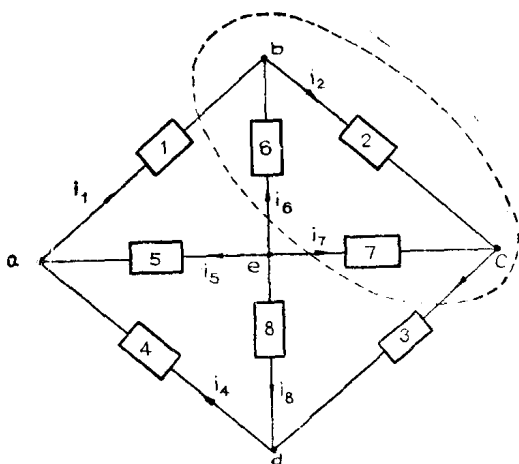


图 1-3-2 列写克希荷夫电流定律方程的例子

$$i_1 = i_4 + i_5 \quad (1-3-1)$$

这样列写并不意味着方程中各支路电流都是正值，只是说明 i_1 的参考方向离开结点 a ， i_4 和 i_5 的参考方向指向结点 a 。将式(1-3-1)的右边各项移到等式左边，可得

$$i_1 - i_4 - i_5 = 0$$

克希荷夫电流定律指出：任一瞬间电路中流出任一结点的各支路电流的代数和为零，即

$$\sum i = 0 \quad (1-3-2)$$

我们规定，上式中参考方向离开结点的支路电流取正号；参考方向指向结点的支路电流取负号。

根据克希荷夫电流定律，对图 1-3-2 电路中的结点 e 列写电流方程，可得：

$$i_5 + i_6 + i_7 + i_8 = 0$$

式中各支路电流的参考方向都是离开结点 e 。如果把各支路电流的数值代入方程，其中某些电流必定为负值或零，否则它们的和就不能为零。所以，列写电流定律方程时要注意两类正负符号，其中一