

普通高等教育规划教材

电路分析原理

上册

姚仲兴 姚维 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



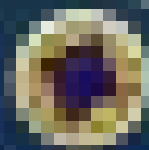
普通高等教育电气工程类教材

电路分析原理

上册

高志华 编著

清华大学出版社



普通高等教育规划教材

电路分析原理

上册

姚仲兴 姚 维 编著



机械工业出版社

作者积 40 余年电路分析课程的教学经验, 参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》编著成本书。

全书分上、下两册。上册十章内容是: 电路的基本概念和定律, 电阻电路及其一般分析法, 线性网络的几个定理及等效网络, 动态电路元件及其强制响应, 正弦稳态电路(含互感及三相)与傅里叶分析。下册七章内容是: 一阶、二阶电路的时域分析, s 域与状态变量分析, 矩阵分析, 双口网络及非线性电阻电路分析。

本教材系统性、逻辑性强, 内容新颖, 风格独特, 言简意赅, 通俗易懂。

本书可作为高等理、工、农、医院校及各类成人高校电类相关专业的本科教材, 也可供有关科技人员参考。本教材很适宜自学。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析原理·上册/姚仲兴, 姚维编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.1

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-15908-X

I. 电… II. ①姚…②姚… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 138982 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 韩雪清 版式设计: 冉晓华

责任校对: 姚培新 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·15.75 印张·614 千字

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版



姚仲兴副教授1936年出生于江苏武进，1952年就读苏州高级工业学校，1956年南京电力学校毕业保送浙江大学，1961年浙江大学电机系毕业留校任教“电路分析”课程至今。出版著作依次有《电路理论习题集》(英译)，《电路分析导论》，《电路分析方法与精品题集》，《电路分析导论》(修订版)，《电路解析与精品题集》。



姚维副教授1966年出生于江苏常州市，1997年浙江大学工业自动化专业获工学博士学位后留校任教。现在浙江大学电气工程学院从事智能控制、嵌入式系统以及电路分析等方面的研究与教学工作。已鉴定研究成果5项，发表论文数十余篇。出版著作有《电路分析方法与精品题集》，《电路分析导论》(修订版)，《电路解析与精品题集》。

前 言

作者参阅了国内外的同类教材,结合自身 40 余年来从事电路分析课程的教学经验,参照《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》编著成本书。

本教材主要介绍在电类相关专业中有关电路分析方面的基本概念、基本原理与基本分析计算方法,为学习电类专业课打下一定的电路理论与实验基础。

本教材有如下特点:①既介绍经典的电路原理,又介绍近代的电路理论,并渗透了作者的研究成果。②以讲稿形式成书,条理清晰,层次分明,教师便于组织教学,学生容易自学。③内容编排由浅入深,难点分散,循序渐进。④凡遇抽象概念,先举实例,后作一般论述(即先建立感性认识,后作理性飞跃)。⑤凡易出差错及尚需深入理解之处,安插思考题,以免差错并予以启发。⑥在算式推导省略部位加注,便于阅读。⑦理论联系实际。⑧例题、习题都经精心设计,概念综合,难易搭配(基本题占 1/2,中等难度题占 1/3,难题占 1/6);既介绍基本分析法,还介绍多种解题技巧;数据简单(作者以支路号赋予元件参数值,如 $u_{S1} = 1V$, $i_{S2} = 2A$, $R_3 = 3\Omega$, $L_4 = 4H$, $C_5 = 5F$, ..., 并使计算结果也是一组良好的数字),教师便于举例,学生免去了枯燥乏味的繁琐的数据运算,可激发解题兴趣。⑨每章后的小结给出了本章重点,便于复习。⑩书末附有习题答案供参考。

考虑到阅读的连贯性,有些可属附录性质的内容,如复数及其运算,三角函数组的正交性质,线性函数等,作者将它们安排在正文中。

打有“*”号的正文作为加深、加宽的参考内容,打有“*”号的例题与习题,难度较大,分析的技巧性较高。

在使用本教材时,如能在每章结束后安排一次课堂练习,将打有“*”号的习题在课堂上练习,并进行讲评,将会收到良好的效果。

本教材系统性与逻辑性强,内容新颖,风格独特,言简意赅,通俗易懂,很适宜于自学。

本书有配套参考书《电路解析与精品题集》,姚维,姚仲兴编著.北京:机械工业出版社,2005.该书着重介绍电路的分析方法与解题技巧,并提供大量的、内容覆盖全部大纲的、概念综合的、形式多样的、难度相当高的、分析方法灵活巧妙的例题与习题(全书有 179 个典型例题,1001 个习题)。通过例题的演示与对习题的分析、求解,能使读者学到的电路理论概念清晰,融会贯通,解题思路敏捷,视野开阔。该书特别适宜于要报考研究生的学生与有关教师参考。

IV

参加本书资料收集、整理等工作的还有章玮博士、黄小柳高工，以及章生根、赵梅芳、陶敏恩、陆渭琴。

由于编著者水平有限，谬误与不妥之处实难避免，敬请广大读者批评指正。

编著者
于浙江大学

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路及电路模型	1
第二节 电路分析中的几个主要物理量	3
第三节 电阻元件、欧姆定律及一段含源电路的特性方程	13
第四节 基尔霍夫定律	17
第五节 独立电压源及实际电源的电压源模型	23
习题	29
第二章 简单电阻电路分析	35
第一节 电阻串联电路	35
第二节 电阻并联电路	37
第三节 电阻混联电路	39
第四节 电路中各点电位的计算	42
第五节 独立电流源及实际电源的电流源模型	44
第六节 电源模型的等效转换	47
第七节 简单含源单口网络的等效电路	50
第八节 受控电源	52
习题	62
第三章 线性电路分析的一般方法	73
*第一节 网络图论的概念	73
第二节 支路电流法	80
第三节 网孔分析	84
第四节 回路分析	89
第五节 节点分析	92
*第六节 割集分析	100
习题	107
第四章 线性网络的几个定理及等效网络	114
第一节 叠加定理	114

第二节	互易定理	122
第三节	替代定理	128
第四节	戴维宁定理	130
第五节	诺顿定理	139
第六节	最大功率传输定理	141
第七节	Y形网络与 Δ 形网络的等效变换	143
*第八节	理想电源的转移	146
	习题	150
第五章	动态电路元件及其强制响应	158
第一节	激励源常用的几个典型函数(波形)	158
第二节	电容器	172
第三节	线性定常电容器的特性方程	174
第四节	电容器储存的能量	184
第五节	电容器的串联与并联	189
第六节	电感器	194
第七节	线性定常电感器的特性方程	196
第八节	电感器储存的能量	201
第九节	电感器的串联与并联	202
*第十节	奇异电路	207
第十一节	实际的电容器与电感器	214
	习题	216
第六章	正弦稳态电路分析	222
第一节	周期函数的平均值与有效值	222
第二节	复数及其运算	225
第三节	正弦时间函数的相量表示	227
第四节	正弦稳态电路中的电阻器	233
第五节	正弦稳态电路中的电感器	236
第六节	正弦稳态电路中的电容器	241
第七节	基尔霍夫定律的相量形式	246
第八节	RLC 串联电路—阻抗	247
第九节	GCL 并联电路—导纳	254
第十节	简单导抗电路分析	260
第十一节	串联谐振电路	266
第十二节	并联谐振电路	279
*第十三节	串并联电路的谐振	288
第十四节	复杂线性电路分析	291

*第十五节 电路的对偶性质	296
习题	300
第七章 正弦稳态电路的功率	311
第一节 平均功率	311
第二节 视在功率	315
第三节 功率因数	316
第四节 无功功率与无功因数	319
第五节 复数功率	324
*第六节 复功率守恒	326
第七节 功率因数的提高	330
第八节 最大功率传输定理	333
第九节 平均功率的测量	338
习题	343
第八章 互感耦合电路分析	350
第一节 耦合电感器与互感电压	350
第二节 耦合电感器的串联	360
第三节 去耦合等效电路	361
第四节 线性变压器电路分析	364
第五节 含有耦合电感器的复杂电路分析	370
第六节 理想变压器	373
习题	381
第九章 三相电路的正弦稳态分析	392
第一节 三相电路概述	392
第二节 几种对称三相电路的分析	397
第三节 不对称三相电路	408
第四节 三相电路的功率	410
第五节 三相电路的功率测量	415
习题	421
第十章 傅里叶分析	428
第一节 周期函数的傅里叶级数与频谱	428
*第二节 几种对称波形	431
第三节 周期电流、电压的最大值、有效值与平均值	441
第四节 非正弦稳态电路的功率	445
第五节 频域中的网络函数	448

VII

第六节 非正弦稳态电路的分析	452
*第七节 对称三相非正弦稳态电路分析	457
习题	471
习题答案	480
参考文献	495

第一章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

电路分析主要任务在于分析电路中的电流、电压以及它们之间的关系等。分析电路依靠电路基本定律。本章先复习电流、电压、功率等基本概念，并介绍电路的基本定律，即欧姆定律、KCL、KVL，最后介绍电压源。

第一节 电路及电路模型

本节介绍电路与电路模型的概念。

一、电路

什么是电路？一个电池、一个灯泡、一个开关、三根连接导线，按照图 1-1 的方式连接起来，这就组成了一个简单的实际的照明电路。由此我们可对电路作如下的定义：人们为了实现某种目的，将若干个电气设备或器件，按照一定的方式连接起来，构成电流的通路，这个通路称为**电路**，或称为**网络**。

在电路理论中，“电路”与“网络”这两个术语并无严格的区别，今后可以混用。

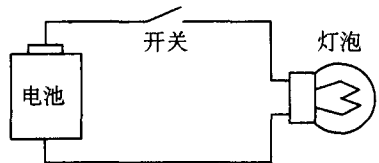


图 1-1 一个简单的实际照明电路

二、电路的形式与功能

电路有哪些形式与功能？电路的形式与功能是多种多样的，它有长达数百公里的输电线路，也有只集中在几平方毫米内的集成电路；

它可以用来实现电能的传输和分配（例如输电线路）；或是用来传输和处理各种电信号（例如控制信号、图像信号、语言信号等等）。

三、实际电路元件

构成电路的设备或器件，称为**实际电路元件**。其中提供电能的设备称为**电源**，例如电池、发电机、信号发生器等；吸收电能的设备称为**负载**，例如各种电阻器、电感器、电容器、晶体管及电动机等等。

在通有电流的电路中，每一个实际电路元件都会出现好几个电磁现象。例如，

当通过**电池**的电流增大时，电池的端电压会降低，电池会发热；电阻器通电后会发热，同时还有磁场产生；电流通过电感器时会产生磁场，电感器也要发热，匝间还有电场；当电容器极板间的电压变化时，电容器中有变化的电场和变化的磁场，介质中还有热损耗等等。上述这些现象对于每一个实际电路元件来说，都是交织在一起的，因此，直接分析由实际电路元件所组成的电路，通常是比较困难的。为此，我们要设法从实际电路元件中抽象出一些理想化的电路元件来，并用这些理想元件去构成实际元件的模型，然后，再分析模型中出现的电磁现象。

四、理想电路元件（集中参数元件）

只显示单一电磁现象，且不计元件几何尺寸，并视其参数集中于一点（无几何大小的点）的电路元件，称为**理想电路元件**，或叫做**集中参数元件**（有两个端钮的二端集中参数元件的特征是，流入一端的电流等于从另一端流出的电流）。理想电路元件分为：

1. 理想的电源元件

独立电压源与独立电流源是理想的电源元件。

2. 理想的负载元件

用来表征电磁能量转换为其他形式能量的**电阻器**，表征电场现象的**电容器**，以及表征磁场现象的**电感器**是理想的负载元件。

3. 理想的耦合元件

受控电源、耦合电感器、理想变压器、回转器等是理想的耦合元件。

上述这些理想电路元件都有精确的数学定义，关于它们的定义，将在后面章节中陆续地给出。

五、电路模型（集中参数电路）

用一个或几个理想电路元件构成的模型去模拟一个实际电路，使得模型中出现的电磁现象与实际电路中反映出来的现象十分近似，这个由理想电路元件组成的电路称为**电路模型**。由于理想电路元件也叫做**集中参数元件**，所以，由集中参数元件构成的电路模型也叫做**集中参数电路**。又因为理想电路元件都有精确的数学定义，所以，电路模型也叫做**数学模型**。

今后，我们分析的电路都是电路模型，模型中的元件都是理想的。这样一来，在电路模型中就能建立电路方程（数学方程）了。

需要指出，当实际电路尺寸远小于电路中电流的波长时，该电路可用集中参数模型模拟；当电路尺寸与波长有相同数量级时，该电路就要用分布参数模型模拟了。本书只讨论集中参数模型。

本书任务在于，对一给定电路模型，如何分析其中出现的电磁现象，以及计

算模型中的物理量（如电流、电压、功率等）。至于如何构成实际电路的模型，这不是本书要讨论的主要内容。

注意，在模型中所得结果只是实际电路中的一种近似。

第二节 电路分析中的几个主要物理量

为适应全书的需要，本节先复习电路分析中的几个主要物理量，以及有关规定。

一、电流

1. 定义与实际方向

电荷定向移动形成**电流**。

单位时间内通过导体横截面的电荷量称为**电流**，以 $i(t)$ 表示。

在图 1-2 中，设在时刻 t 自左向右已通过导体横截面 S 的电荷量为 $q(t)$ ，而在 t 的近旁，在 dt 时间内通过的电荷量为 $dq(t)$ ，当取 $i(t)$ 的方向与 $q(t)$ 一致时，则在该时刻的电流定义为

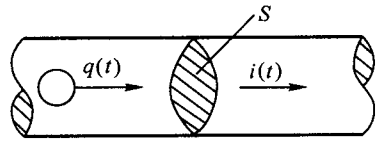


图 1-2 电流 $i(t)$ 定义示意图

$$i(t) \triangleq \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1a)$$

若 $i(t)$ 的方向与 $q(t)$ 相反，则有

$$i(t) \triangleq - \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1b)$$

$i(t)$ 表示电流是 t 的函数。式中符号“ \triangleq ”表示定义为相等，其中“ \triangle ”为定义之意。

人们规定正电荷移动的方向作为电流的实际方向。

2. 时变电流与时变电流电路

如果电流的大小和(或)流向是随着时间 t 改变的，这样的电流称为**时变电流**，以 $i(t)$ (或 i) 表示。

通有时变电流的电路，称为**时变电流电路**。

3. 直流电流与直流电路

如果电流的大小为恒值，方向不变，这样的电流称为**直流电流** (direct current, 缩写 dc, 或 DC), 或**恒定电流**，用斜体字母 I 表示 (由于直流电流仅是时变电流的特例，因此直流电流也可用 i 表示)。

通有直流电流的电路，称为**直流电路**，或**恒定电流电路**。

4. 电流的单位

在SI(国际单位制)基本单位中,电量的单位名称为库[仑](coulomb,符号为C),时间单位名称为秒(second,符号为s),电流的单位名称为安[培](ampere,符号为A),且有

$$1 \text{ 安(A)} = \frac{1 \text{ 库}}{1 \text{ 秒}} \left(\frac{\text{C}}{\text{s}} \right)$$

此外,电流常用的单位还有千安、毫安、微安及纳安等,且有

$$1 \text{ 千安(kA)} = 10^3 \text{ 安(A)} \quad 1 \text{ 毫安(mA)} = 10^{-3} \text{ 安(A)}$$

$$1 \text{ 微安}(\mu\text{A}) = 10^{-6} \text{ 安(A)} \quad 1 \text{ 纳安(nA)} = 10^{-9} \text{ 安(A)}$$

5. 电流的参考方向

分析电路中的电流,依靠电流基本定律,在应用电流基本定律建立电路方程时,必须知道电流的流向。但是,电路中的电流方向通常事先是不知道的,这个矛盾如何解决?对此,可在每段电路中先任意地指定一个电流方向,这个任意指定的电流方向,称为**电流的参考方向**,以箭头符号表示,如图1-3所示[注意,时变电流*i(t)*的参考方向,指的是在时刻*t*这一瞬间的电流方向]。

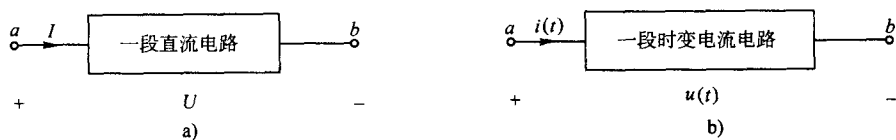


图 1-3 标有电流、电压参考方向的一段电路

a) 直流电路 b) 时变电流电路

有了电流参考方向及计算值的正负,电流的实际方向就能确定了。例如,在图1-3a中,根据图示参考方向,经过计算若有 $I > 0$,表明电流实际方向与参考方向一致;若是 $I < 0$,则电流实际方向与参考方向相反。

必须强调指出,在电路分析中,离开了电流的参考方向谈论电流的正与负是没有意义的。

例 1-1 一段时变电流电路如图1-4a所示,电流*i(t)*与电荷*q(t)*有相反方向。已知通过电路的电荷量*q(t)*与*t*的关系如图b所示[$q(t) > 0$ 为正电荷量, $q(t) < 0$ 为负电荷量],试计算对所有*t*的电流*i(t)*,画出其波形,并指出电流实际方向。

解 采用分段计算。

时变电流电路中的电荷*q(t)*、电流*i(t)*是*t*的函数,图b中的*t*=0定作时间起算点。

图b波形对所有*t*不是同一函数,采用分段计算是合适的。现将*q(t)*波形分为4段,相应电流也分为4段。*i(t)*与*q(t)*反向,电流、电荷间的关系由式(1-1b)

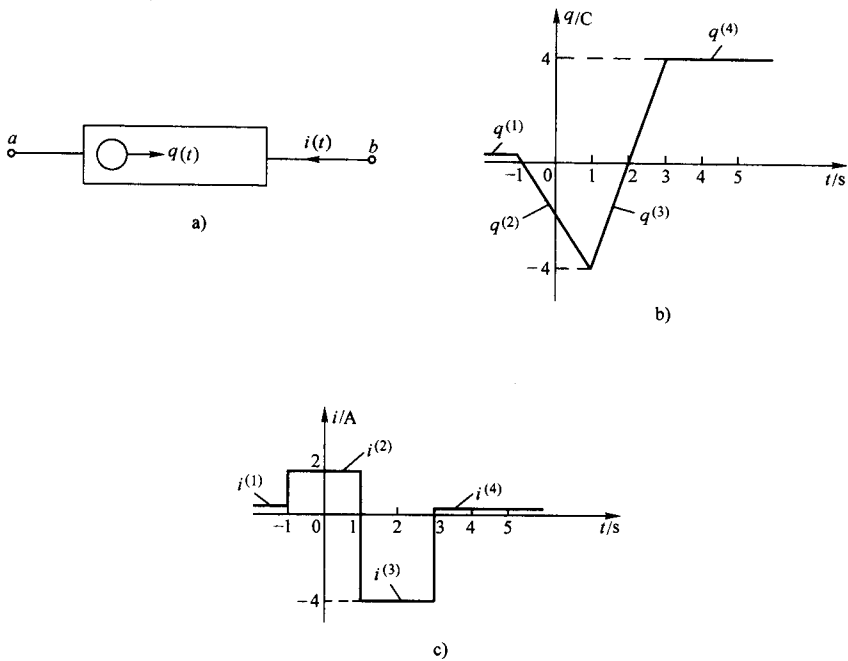


图 1-4 电流与电荷的关系

a) 一段时变电流电路 b) $q(t)$ 波形 c) $i(t)$ 波形

给出为

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

对 $t < -1$ s

$$q^{(1)}(t) = 0 \quad i^{(1)}(t) = 0$$

对 $-1 \text{ s} < t < 1 \text{ s}$

$$q^{(2)}(t) = -2(t^{\ominus} + 1) \text{ C}$$

$$i^{(2)}(t) = -\frac{dq^{(2)}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}[-2(t+1)] \\ = 2 \text{ A}$$

$q^{(2)}(t) < 0$, 且有 $t \uparrow$, 负电荷量 $q^{(2)} \uparrow$, 负电荷自 $a \rightarrow b$ 移动。 $i^{(2)} > 0$, 实际电流自 $b \rightarrow a$ 。

对 $1 \text{ s} < t < 3 \text{ s}$

$$q^{(3)}(t) = 4(t - 2) \text{ C}$$

⊖ 本书述及的方程(不论是量方程还是数值方程)及计算式中,如无特殊说明,时间 t 均以 s 为单位。

$$i^{(3)}(t) = -\frac{dq^{(3)}(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}[4(t-2)] \text{ A} = -4 \text{ A}$$

在 $1 \text{ s} < t < 2 \text{ s}$ 内, $q^{(3)} < 0, t \uparrow$, 负电荷量 \downarrow , 表明正电荷自 $a \rightarrow b$, 使已通过 $a \rightarrow b$ 的净负电荷量 \downarrow ; $t = 2 \text{ s}$, $a \rightarrow b$ 的净电荷量为零; 在 $2 \text{ s} < t < 3 \text{ s}$ 内, $q^{(3)}(t) > 0, i < 0$, 实际电流自 $a \rightarrow b$ 。

对 $t > 3 \text{ s}$

$$q^{(4)}(t) = 4 \text{ C}$$

$$i^{(4)}(t) = -\frac{d4}{dt} = 0$$

$q^{(4)}(t) = \text{定值}$, 表明无电荷定向移动, 电流为零。

$i(t)$ 波形如图 c 所示。

例 1-2 已知在图 1-4a 中电流 $i(t)$ 的波形如图 c 所示, 且知在 $t = 0_-$ 时有 $q^{(2)}(0_-) = -2 \text{ C}$ (即已有 -2 C 电荷通过), 试计算 $t \geq 0$ 后的电荷 $q(t)$, 并画出其波形。

解 图 a 中 $i(t)$ 与 $q(t)$ 反向, $i(t)$ 与 $q(t)$ 之间的关系由式 (1-1b) 得

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

为考察对所有 t 电荷 $q(t)$ 与电流 $i(t)$ 之间的关系, 将上式在 $(-\infty, t)$ 内积分, 得

$$\int_{-\infty}^t dq(\xi) = -\int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (1)$$

为与积分上限 t 加以区别, 式 (1) 中积分变量改用 ξ , 这样有

$$q(t) = -\int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi - \int_0^t i(\xi) d\xi \quad [\text{式中 } q(-\infty) = 0] \quad (2)$$

式 (2) 前一项积分 $-\int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi = q(0_-)$ 是在计时前一瞬间, 即在 $t = 0_-$ 时已通过的电荷量, 该电荷称为**初始电荷** [$q(0_-) > 0$ 为正电荷量, $q(0_-) < 0$ 为负电荷量]; 后一项积分是从计时开始, 即 $t > 0_-$ 后由电流 $i(t)$ 给出的电荷量, 因 $i(t)$ 与 $q(t)$ 反向, 所以该项前带“-”号。这样式 (2) 可写作

$$q(t) = q(0_-) - \int_0^t i(\xi) d\xi \quad (3)$$

式 (3) 表明, 在 $t \geq 0$ 后任一时刻 t 通过的电荷量 $q(t)$, 都要从 $t = 0_-$ 时开始累计。

需要指出, 如果在一段电路上 $q(t)$ 与 $i(t)$ 同向, 则式 (3) 中积分号前带“+”号。

本例根据式 (3) 采用分段计算 (并沿用图 1-4 中的符号)。

在 $t = 0_-$ 时

$$q^{(2)}(0_-) = -2 \text{ C} \quad (4)$$