



新世纪高等院校精品教材

DIANLU FENXI DAOLUN

电路分析导论

(修订版)

上册

姚仲兴 姚维孙 斌 编著

浙江大学出版社

电路分析导论

(修订版)

上册

姚仲兴	姚维
孙斌	编著

浙江大学出版社

内容简介

本书按照国家教育委员会高等教育司于1995年修订的《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》进行修订。

修订版保留了《电路分析导论》第一版的内容、体系、风格与特色(部分内容作了调整与增补)。全书分上、下两册。上册十章,内容是电路的基本概念和基本定律,简单电阻电路分析,线性电路分析的一般方法,线性网络的几个定理及等值网络,动态电路元件及其强制响应,正弦稳态电路分析,正弦稳态电路的功率,互感耦合电路分析,三相电路的正弦稳态分析与傅里叶分析。下册七章,内容是一阶电路的时域分析,二阶电路的时域分析,线性定常电路的 s 域分析,状态变量分析,大型线性网络的矩阵分析,双口网络分析与简单非线性电阻电路分析。书末均附有习题答案。

本书可供高等理、工、农、医院校,各类成人高等学校涉及“电”的相关专业作为本科教材,也可供有关科技人员参考。本书很适宜于自学。

电路分析导论

(修订版)

姚仲兴 姚维 孙斌 编著

责任编辑 杜希武 宋纪浔

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州浙大路38号 邮政编码310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zjupress@mail.hz.zj.cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

德清第二印刷厂

浙江省新华书店经销

* * *

850mm×1168mm 32开 30.75印张 828千字

1988年6月第1版 1997年9月第2版 2004年1月第6次印刷

印数: 16001—17000

ISBN 7-308-01918-7/TM·025 定价: 31.00元(含上、下册)

序 言

本书基本上是根据原高教出版社电工教材编审委员会于1980年6月审订的高等工业学校四年制电类各专业试用的《电路教学大纲(草案)》进行编写的。全书共十六章,分上、下两册出版。

本书是电路理论的系统性导论,主要介绍有关电路理论的基本概念、基本原理与基本分析方法。

本书有如下特点:(1)以讲稿形式成书。(2)凡是抽象概念都先通过实例具体化,然后再作一般性的描述。(3)在要加深概念理解、以及容易出现差错之处,都辅以思考题提醒读者注意。(4)书中每节编入了较多的典型例题,并介绍了多种解题方法与技巧。(5)每章后有习题。这些习题主要在于培养读者分析问题与解决问题的能力,而数据处理较为简单。(6)每章后有小结。

本书很适宜于自学。

本教材经方正瑚副教授审阅。简柏敦教授、邓汉馨教授对书稿提出了许多宝贵的修改意见。教研室的同志们,以及张心富、孙士乾、周逸翔、汪荣源、秦鸿达、胡继良、黄小柳、陆渭琴等同志为出版本书给予了很大的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,谬误之处实是难免,敬请广大读者批评指正。

姚仲兴

1987年12月25日

于浙江大学

修订版序言

本书自1988年问世以来,承蒙校内外师生的厚爱,已重印四次。经过八年教学实践,听取了师生们的反馈信息,按照国家教育委员会高等教育司于1995年修订的《高等学校工科本科电路课程教学基本要求》进行修订。

本教材是电路理论的系统性导论,主要介绍有关电路理论的基本概念、基本原理与基本分析方法。

修订版保留了第一版的内容、体系、风格与特色。增补了运算放大器与简单非线性电阻电路分析;论证更为直观、严密;更换与增加了部分例题,调整了部分习题,增加了基本练习题;书末给出了习题答案;文字描述作了进一步的推敲与修饰。

修订版有下列特点:(1)既介绍基本的传统理论,又反映了当代电路理论新发展,并充实了作者的研究成果。(2)叙述由浅入深,由特殊到一般;难点分散,循序前进。(3)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。(4)凡遇抽象概念,先举实例,后作一般描述。(5)凡易出现差错及尚需深入理解之处,安插思考题,以免除差错并予启发。(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,难易适中;既介绍基本分析方法,还介绍多种解题技巧;数据简单有趣(作者以支路号赋予元件参数值,并使计算结果也是一组良好的数字)。学生能将主要精力化在掌握基本分析方法与解题技巧上,免除了繁琐的数据运算,提高了学习兴趣。(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。

为了系统性,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,作者仍将它们安排在正文中。

有些内容,如网络图论的概念,理想电源的转移, δ 函数的性质及其证明,奇异电路,对偶电路,复功率守恒的证明,零输入响应是初

始值的线性函数、零状态响应是激励的线性函数、线性定常零状态网络的定常特性的证明,以及一阶奇异电路等,各校可视具体情况讲解。其它内容亦可作相应取舍。

使用本教材教师不必再作系统讲解,仅需对每节内容的实质问题作着重说明,省下的课时加强课堂练习。如能在每章结束后安排一、二次课堂练习,定将收到良好的效果。

本书很适宜于自学。

本书(后简称《导论》)的配套教材是《电路分析方法》(后简称《方法》),姚仲兴、姚维编著,1994年浙江大学出版社出版。该书着重介绍电路的分析方法与解题技巧,并提供大量的练习题。全书十七章内容的编排与《导论》相同。《方法》一书尤其适宜于要报考研究生的学生参考。

本书第四、五、七、九、十一、十二、十四、十七章由姚维编写,第三、六、八、十、十三、十五、十六章及全书习题答案由孙斌编写,姚仲兴编写一、二章,并负责全书统稿与文字修饰。

在本书的修订与出版过程中,得到了教研室的同事们,特别是简柏敦教授、陈汉民高工(教授级)、严克宽副教授、奚寿根副教授、吴筱青副教授、艾维贤副教授、杨文海副教授、宋水孝副教授、孙焕根副教授、金方勤高工、胡汉雄高工、邵金水高工、王恒辉副研究员,以及陶敏恩、陆渭琴等同志的大力相助,在此表示衷心的感谢。还要感谢使用本教材的全体师生为本书作出的贡献。

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。

姚仲兴

1996年6月15日

于求是园

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	(1)
§ 1-1 电路及电路模型	(1)
§ 1-2 电路分析中的几个主要物理量	(3)
§ 1-3 电阻元件、欧姆定律及一段含源电路的特性方程	(13)
§ 1-4 基尔霍夫定律	(18)
§ 1-5 独立电压源及实际电源的电压源模型	(25)
习题	(33)
第二章 简单电阻电路分析	(38)
§ 2-1 电阻串联电路	(38)
§ 2-2 电阻并联电路	(41)
§ 2-3 电阻混联电路	(43)
§ 2-4 电路中各点电位的计算	(46)
§ 2-5 独立电流源及实际电源的电流源模型	(49)
§ 2-6 电源模型的等值转换	(55)
§ 2-7 简单含源二端网络的等值电路	(58)
§ 2-8 受控电源	(60)
习题	(75)
第三章 线性电路分析的一般方法	(83)
§ 3-1 网络图论的概念	(83)
§ 3-2 支路电流法	(93)
§ 3-3 网孔分析	(97)
§ 3-4 回路分析	(103)
§ 3-5 节点分析	(107)
§ 3-6 割集分析	(117)
习题	(126)
第四章 线性网络的几个定理及等值网络	(132)
§ 4-1 叠加定理	(132)
§ 4-2 互易定理	(140)

§ 4-3 替代定理	(148)
§ 4-4 戴维宁定理	(151)
§ 4-5 诺顿定理	(160)
§ 4-6 最大功率传输定理	(163)
§ 4-7 Y 形网络与 Δ 形网络的等值变换	(166)
§ 4-8 理想电源的转移	(170)
习题	(176)
第五章 动态电路元件及其强制响应	(185)
§ 5-1 激励源常用的几个典型函数(波形)	(185)
§ 5-2 电容器	(205)
§ 5-3 线性定常电容器的特性方程	(207)
§ 5-4 电容器储存的能量	(216)
§ 5-5 电容器的串联与并联	(220)
§ 5-6 电感器	(225)
§ 5-7 线性定常电感器的特性方程	(228)
§ 5-8 电感器储存的能量	(234)
§ 5-9 电感器的串联与并联	(236)
§ 5-10 奇异电路	(241)
§ 5-11 实际的电容器与电感器	(247)
习题	(250)
第六章 正弦稳态电路分析	(257)
§ 6-1 周期函数的平均值与有效值	(258)
§ 6-2 复数及其运算	(261)
§ 6-3 正弦时间函数的相量表示	(264)
§ 6-4 正弦稳态电路中的电阻器	(271)
§ 6-5 正弦稳态电路中的电感器	(274)
§ 6-6 正弦稳态电路中的电容器	(281)
§ 6-7 基尔霍夫定律的相量形式	(286)
§ 6-8 RLC 串联电路—阻抗	(287)
§ 6-9 GCL 并联电路—导纳	(296)
§ 6-10 简单导抗电路分析	(303)
§ 6-11 串联谐振电路	(309)

§ 6-12 并联谐振电路	(326)
§ 6-13 串并联电路的谐振	(336)
§ 6-14 复杂线性电路分析	(339)
§ 6-15 电路的对偶性质	(343)
习题	(354)
第七章 正弦稳态电路的功率	(364)
§ 7-1 平均功率	(364)
§ 7-2 视在功率	(369)
§ 7-3 功率因数	(370)
§ 7-4 无功功率与无功因数	(373)
§ 7-5 复数功率	(379)
§ 7-6 复功率守恒	(381)
§ 7-7 功率因数的提高	(385)
§ 7-8 最大功率传输定理	(388)
§ 7-9 平均功率的测量	(393)
习题	(400)
第八章 互感耦合电路分析	(406)
§ 8-1 耦合电感器与互感电压	(406)
§ 8-2 耦合电感器的串联	(415)
§ 8-3 去耦合等值电路	(417)
§ 8-4 线性变压器电路分析	(420)
§ 8-5 含有耦合电感器的复杂电路分析	(428)
§ 8-6 理想变压器	(431)
习题	(440)
第九章 三相电路的正弦稳态分析	(449)
§ 9-1 三相电路概述	(449)
§ 9-2 几种对称三相电路的分析	(456)
§ 9-3 不对称三相电路	(468)
§ 9-4 三相电路的功率	(471)
§ 9-5 三相电路的功率测量	(477)
习题	(485)
第十章 傅里叶分析	(492)

§ 10-1	周期函数的傅里叶级数与频谱	(492)
§ 10-2	几种对称波形	(496)
§ 10-3	周期电流、电压的最大值、有效值与平均值	(508)
§ 10-4	非正弦稳态电路的功率	(513)
§ 10-5	频域中的网络函数	(517)
§ 10-6	非正弦稳态电路的分析	(521)
§ 10-7	对称三相非正弦稳态电路分析	(527)
习题		(543)
习题答案		(553)

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。

§ 1-1 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**。

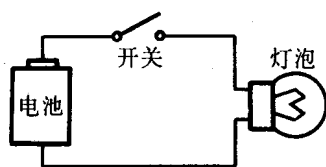


图 1-1 一个简单的实际电路

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。

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

只显示单一电磁现象的电路元件，称为**理想电路元件**，或叫做**集中参数元件**。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它形式能量的**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

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，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。

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。

§ 1-2 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

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。如果在时刻 t 的近旁,在 dt 时间内通过的电荷量为 $dq(t)$,则在该时刻的电流为

$$i(t) = dq(t)/dt \quad (1-1)$$

$i(t)$ 表示电流是 t 的函数。

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, 简写 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,电量的单位为库仑 (coulomb, 简写 C), 时间单位为秒 (second, 简写 s), 电流单位为安培 (ampere, 简写 A), 且有

$$1 \text{ 安培 (A)} = 1 \text{ 库仑 / 1 秒 (C/s)}$$

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

在电路分析中,首先要知道电流的方向后才能着手分析电路。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 1-2 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]。

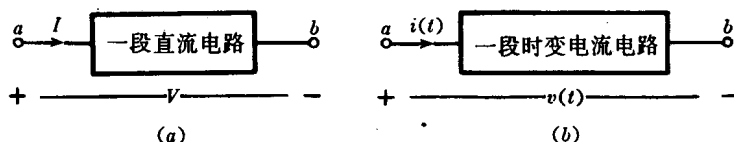


图 1-2 标有电流、电压参考方向的一段电路

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 1-2(a)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 $I < 0$,则有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 在图 1-2(b)中,在时刻 t_1 ,设有 $i(t_1) = -1\text{A}$,试指出该时刻电流的实际方向。

解 $i(t_1) = -1\text{A}$,表明在时刻 t_1 ,电流实际方向与参考方向相反,即从 b 端流向 a 端的电流为 1A 。

二、电位

在电路中选择一点作为**参考点**(参考点电位一般定为零),则其余各点对参考点来讲都有**电位**。

1. 定义与单位

在直流电路中,库仑电场力移动单位正电荷从 a 点到参考点 o 所作功的大小,定义为 a 点的电位值,以 V_a 表示。

如果库仑电场力移动正电荷 Δq 从 a 点到参考点 o 作功 ΔW , 则 a 点的电位值为

$$V_a = \Delta W / \Delta q \quad (1-2)$$

注意, 式中 ΔW 是库仑电场力作的功, 也即是电场能量的减少。

电位的单位为伏特(volt, 简写 V)。常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

例 1-2 设非库仑电场力移动负电荷 $2C$ 从 a 点到参考点 o 作功 $10J$ [能量单位为焦耳(joule, 简写 J)], 试计算 a 点的电位值。

解 被移动的电荷量为 $\Delta q = -2C$, 非库仑电场力作功, 使电场能量增加, 即 $\Delta W = -10J$, 这样由(1-2)式得

$$V_a = \Delta W / \Delta q = -10 / -2 = 5 \text{ V}$$

2. 电位的参考极性

在分析电路中的电位时, 必须知道这些点的电位比参考点高还是低后才能建立电路方程进行讨论。可是这些点的电位高低一般并不知道, 解决的方法是按照惯例, 指定参考点为“—”极性(在电子电路中, 有时指定参考点为“+”极性), 其余各点均为“+”极性, 这样指定的极性称为**电位的参考极性**。

“+”极性表示高电位端。

在电路中, 人们常用接地符号“ $\perp$ ”表示参考点。

在直流电路中, 本书采用的电位参考极性的表示方式如图 1-3 所示。

根据电位的参考极性 & 计算值的正负, 就能确定各点电位的高低。例如, 对图 1-3 所示参考极性, 经过计算设有 $V_1 = 1V$, $V_2 = -2V$, 这表明, 点①电位比参考点 o 高

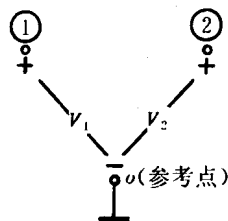


图 1-3 直流电路中电位参考极性的表示

1V, 点②电位比参考点 o 高 $-2V$, 实为低 $2V$ 。

三、电压(电位差、电位降、电压降)

1. 定义及参考极性

在直流电路中, 设 a 点电位为 V_a , b 点电位为 V_b , 则定义

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

为 a 、 b 两点间的电压, 或叫做 ab 间的电位差、电位降、电压降。

在直流电路中, V_a 、 V_b 有恒定值, 所以 V_{ab} 也有恒定值, 这样, V_{ab} 亦叫做**恒定电压**, 或**直流电压**(以下简称电压)。下标 ab 表示电位自 a 点到 b 点是降低的。例如, 设有 $V_a = 3V$, $V_b = 1V$, 则有 $V_{ab} = V_a - V_b = 3 - 1 = 2V$, 这表明从 a 点到 b 点电位降低了 $2V$ 【思考 从 b 点到 a 点电位降低了多少?】。

电压单位与电位单位相同, 即**伏特(V)**。

类似地, 在分析电路中两点间的电压时(当这两点的电位未知时), 也要先指定这两点电压的极性(任意指定), 这个任意指定的极性, 称为**电压的参考极性**。

在直流电路中, 本书采用的电压参考极性的表示方式如图 1-2(a)所示[在图 1-2(b)中给出了时变电压 $v(t)$ 的参考极性]。“+”极性表示高电位端, “-”极性表示低电位端。

有了电压的参考极性及计算值的正负, 两点间电位的高低就能确定了。例如, 在图 1-2(a)中, 根据指定的电压极性, 经计算设有 $V > 0$, 表明 a 点电位高于 b 点; 若有 $V < 0$, 表明 a 点电位低于 b 点。

在电路分析中, 离开了电压的参考极性谈论电压的正与负也是没有意义的。

在图 1-2(a)中, 有时还给电压 V 加注下标 ab , 即将 V 写成 V_{ab} (下标 ab 意指 a 点为“+”极性, b 点为“-”极性), 这种表示方式称为电压参考极性的**双重表示法**。

需要指出, 电压的“参考极性”与“参考方向”这两个术语可以混用。