

● 高等学校教材

● 「第三版」上册

电路 分析 基础

● 李瀚荪 编

DIANLUFENXI
JICHU

高等教育出版社

高等学校教材

电路分析基础

(第三版)

上 册

李瀚荪 编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是获国家优秀教材奖的《电路分析基础》(第二版)的修订本,内容符合国家教育委员会1986年颁布的《高等工业学校电路分析基础课程教学基本要求(90~120学时)》。经国家教育委员会高等学校工科电工课程教学指导委员会电路理论及信号分析小组审查,同意作为电路分析基础课程教材出版。

本书保留了原版本的体系结构和风格特点,根据教学需要对部分内容作了调整。全书共有十五章和两个附录,分上、中、下三册出版。上册为电阻电路分析部分,包含集总电路中电压、电流的约束关系,运用独立电流、电压变量的分析方法,大规模电路分析方法概要,分解方法及单口网络,简单非线性电阻电路的分析等内容。中册为动态电路分析,包含电容元件与电感元件,一阶电路,二阶电路,冲激函数在动态电路分析中的应用,交流动态电路等。下册为正弦稳态分析,包含阻抗与导纳,正弦稳态的能量和功率,三相电路,耦合电感和理想变压器,双口网络,频率响应等。另有两个附录:磁路和拉普拉斯变换在电路分析中的应用。配合正文,有较丰富的例题、思考题、练习题和习题,书末附有部分习题答案。

本书可作为电子、通信、自控等弱电类专业电路分析基础课程教材,也可供有关科技人员参考。

责任编辑 楼史进

高等学校教材
电路分析基础
(第三版)

上 册
李瀚荪 编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.625 字数 230 000

1978年7月第1版 1992年5月第3版 1992年5月第1次印刷

印数 0001—5 320

ISBN 7-04-003721-1/TM·198

定价 3.70 元

第三版前言

《电路分析基础》第二版问世以来,已历八个春秋。这次修订是根据国家教育委员会高等学校工科电工课程教学指导委员会1986年制订的《高等工业学校电路分析基础教学基本要求(90~120学时)》(以下简称《基本要求》),并参考使用者的意见和编者在教学实践中的体会进行的。

第三版保留了第一、二版的体系,仍分三册出版,并保留了原来的编写特点(参看第二版前言)。修订的主要工作如下:(1)对照《基本要求》检查了原有内容,设法加强甲类要求的内容,凡未列入《基本要求》的内容则用小号字排印或在有关章、节等标题前冠以*号。对极少数虽未列入《基本要求》但为本书所需者仍以正常方式排印,如“置换定理”。(2)对部分章节重新作了安排,使课程的基本结构更为清晰,以利教学。例如,把原来第二章和第五章的部分内容合并,构成新的一章,在“分解”的观点下,讨论单口网络的伏安关系、等效、置换等内容,目标明确,联系紧密,而把叠加定理移至第一章以表明其在线性电路分析中的重要地位,把互易定理移至与其密切相关的“双口网络”一章。(3)考虑到在本门课程讲授均匀传输线内容的学校不多,而要求增加磁路及拉普拉斯变换等内容的较多,此次修订删去了附录“均匀传输线”,而代之以“磁路”和“拉普拉斯变换在电路分析中的应用”。(4)加强联系实际为后续课程(特别是电子线路)服务的内容。例如,在原有习题基本不变的情况下又增加了这方面的一些题目,重新编写了“谐振”的内容,增添“含运算放大器电阻电路分析”的内容等。(5)根据

中华人民共和国国家标准局颁布的有关电气图形符号的规定和有关电路和磁路的基本规定,改正了原版本中不相符合之处。

电工课程教学指导委员会电路理论与信号分析课程小组仍委托西安交通大学范丽娟教授对修订稿进行审阅,范教授提出了不少宝贵的意见。机电部标准化研究所杨芙同志提供了有关国家标准的资料,使编写工作得以顺利进行。编者谨致以衷心的感谢。教研室的同事和北京理工大学近几届的同学都曾对第二版以及这次修订工作提出过十分有益的意见和建议,编者深表谢意。

修订工作历时三年,数易其稿,但限于编者的水平,缺点和错误难以避免,希望读者批评指正,来信请寄北京理工大学电子工程系(邮政编码 100081)。

编 者

1991年7月

第二版前言

本书系《电路分析基础》1978年第一版的修订本,根据高等学校工科电工教材编审委员会1980年6月审订的高等工业学校四年制无线电技术类专业试用的《电路分析基础教学大纲(草案)》改编而成。

修订本保留了原版本的体系,分为电阻电路分析、动态电路分析及正弦稳态分析三大部分。为便于使用,修订本按照这三大部分分为上、中、下三册出版。如只需讲授电阻电路分析及正弦稳态分析,可只选用上、下两册,使用下册时只需略加补充即可。在电阻电路分析部分,增添了“大规模电路分析方法概要”和“简单非线性电阻电路分析”两章,前者供需要在本课程讲授用系统的方法列出电路方程者选用,后者则系为加强电子线路课程的联系而增添的。考虑到有些院校在本课程后不接着开设信号与系统课程,故在动态电路分析部分增添了“冲激函数在动态电路分析中的应用”一章,使学生能及时学到这些内容,可供选用。在正弦稳态分析部分则增添了“双口网络”一章,以及用零、极点概念分析频率响应的内容。根据大纲的要求,增添了“均匀传输线”的内容(放在附录),另外,删去了“磁路”部分,根据电路理论与信号分析编审小组意见,将组织编写该部分的参考书公开出版,作为教材内容的补充。

修订本还包括其他一些加宽、加深的內容。凡属选读内容如属整章、整节及整道例题者均加排*号,如属一节中的部分内容则用小号字排印,以资区别。修订时,对一些章、节的标题也作了改动,使能更准确地反映章、节的内容。

修订中,注意保留了原版本的编写特点,力求做到便于自学,使能适应启发式教学方法的需要。重视学科的系统性,叙述力求清楚、准确,注意正文、例题、思考题、练习题和习题五者间的密切配合。这次修订时,许多章、节都按照这些要求重新进行了编写,对原有的例题、思考题、练习题和习题也进行了删增和改写。在使用本教材时,教师不宜逐章、逐节、逐个例题地依次讲授,这样做,时间既不允许,也不利于培养学生独立学习的能力。本书的一些内容特别是众多的例题都可留给学生自学。每章后列出的参考书目,既为教师提供了该章一些内容的出处与依据,也为学生在选阅参考书时提供便利。学生应尽量看点参考书,以便开阔思路,学得更活。修订本的习题增加较多,可供教师选用。书后附有部分习题的答案和提示,可供参考。

电工教材编审委员会电路理论与信号分析编审小组仍委托西安交通大学范丽娟,刘国柱两位同志对修订稿进行复审。两位同志对书稿进行了仔细审阅,提出不少宝贵意见,编者谨致以衷心的感谢。上海科技大学无线电系吴锡龙同志对修订稿也提出不少宝贵意见,还对习题进行了核算。教研室的同事们,从讨论修订设想到最后定稿都给了编者很多帮助。对此,编者深表谢意。

本书在修订中参照各方面读者提出的意见,经过认真考虑,虽然作了一些改进,但是限于编者的水平,缺点和错误仍难避免,希望读者批评指正。意见请寄北京工业学院自动控制系。

编 者

1983年4月

目 录

第一部分 电阻电路分析

第一章 集总电路中电压、电流的约束关系	2
§ 1-1 电路及电路模型 集总假设.....	2
§ 1-2 电路变量 电流、电压及功率.....	7
§ 1-3 基尔霍夫定律.....	17
§ 1-4 电阻元件.....	28
§ 1-5 电压源.....	38
§ 1-6 电流源.....	46
§ 1-7 分压电路与分流电路.....	51
§ 1-8 受控源.....	58
§ 1-9 两类约束 电路 KCL、KVL 方程的独立性	64
§ 1-10 支路电流法和支路电压法.....	71
§ 1-11 线性电路和叠加定理.....	73
参考书目	85
习题一.....	86
第二章 运用独立电流、电压变量的分析方法	101
§ 2-1 网孔分析法.....	102
§ 2-2 节点分析法.....	109
§ 2-3 含运算放大器的电阻电路	120
§ 2-4 树的概念.....	128
* § 2-5 割集分析法.....	131
§ 2-6 回路分析法.....	138
* § 2-7 线性电阻电路解的存在性与唯一性定理.....	143
参考书目	147
习题二.....	148

*第三章 大规模电路分析方法概要	155
§ 3-1 关联矩阵	155
§ 3-2 基本回路矩阵	160
§ 3-3 支路方程的矩阵形式	162
§ 3-4 节点分析法	164
§ 3-5 回路分析法	173
§ 3-6 基本割集矩阵和割集分析法	177
参考书目	182
习题三	182
第四章 分解方法及单口网络	184
§ 4-1 分解的基本步骤	185
§ 4-2 单口网络的伏安关系	187
§ 4-3 单口网络的置换——置换定理	190
§ 4-4 单口网络的等效电路	197
§ 4-5 一些简单的等效规律和公式	202
§ 4-6 戴维南定理	215
§ 4-7 诺顿定理	229
§ 4-8 最大功率传递定理	232
§ 4-9 T形网络和 Π 形网络的等效变换	236
参考书目	241
习题四	242
第五章 简单非线性电阻电路的分析	258
§ 5-1 含一个非线性元件的电阻电路的分析	258
§ 5-2 理想二极管	266
* § 5-3 假定状态分析法	274
§ 5-4 非线性电阻的串联、并联和混联	276
* § 5-5 小信号分析	281
参考书目	286
习题五	287
第一部分 部分习题答案	294

第一部分

电阻电路分析

第 一 章

集总电路中电压、电流的约束关系

由电阻、电容、电感等集总参数元件组成的电路称为集总电路。本书讨论集总电路的分析。只含电阻元件和电源元件的电路，称为电阻电路，是集总电路的一类。本书第一部分讨论电阻电路的分析，分为五章。

在这一章中，我们将阐明集总电路中电压、电流所应服从的基本规律，即它们之间的约束关系，这是分析各种类型集总电路的基本依据。我们还将进一步阐明线性集总电路的基本属性——叠加性质。这些内容是全书的基础所在。在阐明这些内容的同时，我们讨论电阻电路的基本分析方法。

§ 1-1 电路及电路模型 集总假设

电在日常生活、工农业生产、科研以及国防等各个方面都有广泛的应用。在通信、自动控制、计算机、电力等各个电技术领域，使用许多电路来完成各种各样的任务。电路的作用大致可分为：

1. 提供能量，例如供电电路；
2. 传送和处理信号，例如电话线路、放大器电路；
3. 测量电量，例如万用表电路（用来测量电压、电流和电阻等）；
4. 存贮信息，例如计算机的存贮器电路，存放数据、程序。

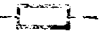
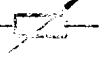
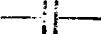
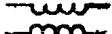
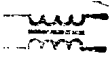
电路虽然多种多样，功能也各不相同，但它们是受共同的基本规律支配的。正是在这种共同规律的基础上，形成“电路理论”这一学科。“电路分析基础”属于“电路理论”学科，它是“电路理论”的入门课程。通过这门课的学习，使学生掌握电路的基本理论和

基本分析方法，为学习电类专业及进一步学习电路理论打下基础。

各种实际电路都是由电器件(device)如电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、电源等相互联接所组成的。我们日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路，它是由干电池、灯泡、手电筒壳(联接导体)组成的，如图 1-1(a)。干电池是一种电源，

表 1-1 部分电气图用图形符号

(根据国家标准 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		扬声器		电阻器	
联接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		电感器、绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		电池		直流发电机	
伏特表				直流电动机	

对电路提供电能;灯泡则是用电的器件,称为负载,当电流流过时能发热到白炽状态而发光;联接导体可使电流构成通路。各种电器件可以用图形符号表示,表 1-1 列举了一些我国国家标准中的图形符号 ①。采用这些符号可绘出表明各电器件相互联接关系的电气图(electric diagram)。手电筒电路的电气图如图 1-1(b)所示。

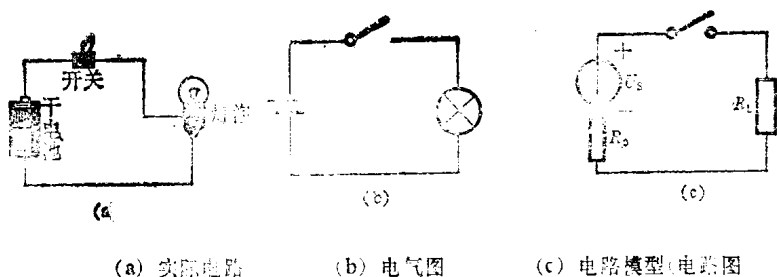


图 1-1 手电筒电路

人们设计制作某种器件是要利用它的某种物理性质,譬如说,制作一个电阻器是要利用它的电阻,即对电流呈现阻力的性质;制作一个电源是要利用它的两极间能保持有一定电压的性质;制作联接导体是要利用它的优良导电性能,使电流顺利流过。但是,事实上,不可能制造出只表现出某一性质的器件,也就是说,不可能制造出理想的器件。譬如说,一个实际的电阻器有电流流过时还会产生磁场,因而还兼有电感的性质;一个实际电源总有内阻,因而在使用时不可能总保持一定的端电压;联接导体总有一点电阻,甚至还有电感。这样就往往给分析电路带来困难。因此,我们必须在一定的条件下对实际器件加以理想化,忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要性能的模式(model)来表示。譬如说,灯泡的

① 摘自《中华人民共和国国家标准 电气图用图形符号》(GB4728), 中国标准出版社,1986 年

电感是极其微小的,把它看作一个理想电阻元件是完全可以的;一个新的干电池,内阻和灯泡电阻相比可以忽略不计,把它看作一个电压恒定的理想电压源也是完全可以的;在联接导体很短的情况下,它的电阻完全可以忽略不计,可看作为理想导体。于是,这个理想电阻元件就构成了灯泡的模型,这个理想电压源就构成了干电池的模型,而理想导体则构成了联接导体的模型。电路理论分析的对象是电路模型而不是实际电路。

各种实际器件都可以用理想模型来近似地表征它的性能。实际器件的运用一般都和电能的消耗和电磁能的存贮现象有关。电能的消耗发生在器件的所有导体通路之中,电磁能则存贮在器件的电场、磁场之中。一般这些现象同时存在,且又发生在整个器件之中,交织在一起。所谓“理想化”,在这里指的就是:假定这些现象可以分别研究,从而可以用所谓的“集总参数元件(lumped parameter element)”(简称“集总元件”)来构成模型。每一种集总元件都只表示一种基本现象,且可用数学方法精确定义。前面提到的理想电阻元件便是一种只表示消耗电能(转换为热能或其他形式能量)的元件,因而是一种集总元件。此外,还有只表示存贮电场能量的理想电容元件和只表示存贮磁场能量的理想电感元件,它们也都是集总元件。三种现象分别集中在这三种元件之中。在构成电路模型时,我们还需要两种理想电源元件——电压源元件和电流源元件。上述的元件都具有两个端钮,称为二端元件(或称单口元件)。除二端元件外,往往还需要四端元件(双口元件),如受控源、理想变压器、耦合电感等。在本书中,元件一般均系指二端元件。在一定条件下有些实际器件的模型较简单,只需涉及一种理想元件,例如,在低频时实际电阻器往往可用一个理想电阻元件来作为它的模型。有些器件的模型可能要由几种理想元件构成。以后我们将陆续讨论这些理想元件的定义和性能。至于如何用理

想元件构成模型的问题则不是本课程所要讨论的主要问题。

为器件建立模型时,采用上述的集总假设是有条件的。集总意味着把器件的电场和磁场分隔开,电场只与电容元件相关联,磁场只与电感元件相关联,这样,两种场之间就不存在相互作用,而电场与磁场间的相互作用将产生电磁波,一部分能量将通过辐射损失掉。因此,只有在辐射能量可以忽略不计的情况下才能采用集总的概念,这就要求器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长,这便是采用集总概念的条件。举例说,我国电力用电的频率为 50 Hz,对应的波长为 6000 km,对以此为工作频率的实验室设备来说,其尺寸与这一波长相比可以略而不计,因而用集总的概念是完全可以的,但对远距离输电线来说,就必须考虑到电场、磁场沿电路分布的现象,不能用集总参数而要用分布(distributed)参数表征。

由集总元件组成的电路模型称为集总电路模型,或迳称之为集总电路。本书只讨论集总电路的分析,因此,以后我们将省略“集总”二字。各理想元件也可用图形符号表示,绘成电路图,供我们分析计算。理想元件图形符号将陆续介绍。图 1-1(c)表示图 1-1(a)手电筒电路的一种电路模型,考虑了电池的内阻 R_0 ,图中引用了的理想电阻元件和理想电压源元件的图形符号。图中引用的理想开关的图形符号与开关的电气图形符号有所不同,理想开关在闭合时其电阻为零,断开时电阻为无限大。为简便计,今后我们将省略“理想”二字,元件均系指理想元件而言。电路图并不反映实际电路的大小尺寸,在集总电路的分析问题中,器件及电路的尺寸是无关紧要的①。

许多器件可以用电阻元件作为模型,如灯泡、电烙铁以及碳膜

① 器件的尺寸对构成模型的元件参数的数值有关,但形成模型,且算出或确定参数后,就无需再考虑器件的尺寸。

电阻、线绕电阻等电阻器、晶体管以及许多数字集成电路、逻辑电路等在一定条件下也可以用电阻元件和电源元件作为模型。我们把只含电阻元件和电源元件的电路称为电阻电路，图 1-1(c)所示即为电阻电路一例。它是很重要的一类电路，就处理方法上说又是最简单的，我们将首先学习这类电路的分析方法。

集总假设是本书最主要的假设。以后所述的电路基本定律均是在这一假设的前提下才能使用的。

§ 1-2 电路变量 电流、电压及功率

电路分析使我们能够得出给定电路的电性能，这意味着电路的电性能通常可以用一组表为时间函数的变量来描述，电路分析的任务在于解得这些变量。这些变量中最常用到的便是电流、电压和功率。

电子和质子都是带电的粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。所带电荷的多少叫电量，在国际单位制(SI)中，电量的单位是库仑(国际代号C)， 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于1库仑。我们用符号 q 或 Q 表示电量。带电粒子有秩序的移动便形成电流。

我们把每单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度常简称为电流，用符号 i 表示，即

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

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。

如果电流的大小和方向不随时间变化，则这种电流叫做恒定电流，简称直流(direct current，简写作dc或DC)，可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化，则称为交变电流，简称交流(alternating current，简写作ac或AC)。

在国际单位制中,电流的单位是安培(中文代号为安,国际代号为A)。安培是国际单位制的基本单位之一^①。

上面已经提到正电荷运动的方向规定为电流的方向,但在实际问题中,电流的真实方向往往难以在电路图中标出。例如,当电路中的电流为交流时,就不可能用一个固定的箭头来表示真实方向。即使电流为直流,在求解较复杂电路时,也往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这样的困难,我们引用参考方向(reference direction)这一概念。参考方向可以任意选定,在电路图中用箭头表示。我们规定:如果电流的真实方向与参考方向一致,电流为正值;如果两者相反,电流为负值。这样,我们就可利用电流的正负值结合着参考方向来表明电流的真实方向。例如, -1 A 表示正电荷以每秒一库仑的速率逆着参考方向箭头移动。在分析电路时,我们尽可先任意假设电流的参考方向,并以此为准去进行分析、计算,从最后答案的正、负值来确定电流的真实方向。显然,在未标示参考方向的情况下,电流的正负是毫无意义的。

参考方向并不是一个抽象的概念。当我们用磁电式电流表测量电路中的未知电流时,事实上首先就为未知电流选定了参考方向。我们都知道,电流表有两个端钮,一个标有“+”号,另一个标有“-”号,如图1-2(a)所示。当电流 i 由“+”端流入电流表时,指针正向(顺时针方向)偏转,电流为正值;当电流 i 由“-”端流入电流表时,指针反向偏转,电流为负值。这就是说,当我们把电表接入电路时,实际上就选定了被测电流的参考方向是由电表的“+”端经过电表指向电表的“-”端的,如图(b)、(c)所示。如把

^① 国际单位制(SI)的基本单位是:米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(热力学温度)、摩尔(物质的量)和坎德拉(光强度)。其他物理量的单位均可由这些基本单位来表示,称为国际制导出单位,例如电量的国际制单位库仑可表示为 $1\text{ 库}=1\text{ 安}\cdot\text{秒}$ 。