

电工基础

1

电路基础

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

$$\begin{aligned} I(S) &= 0 \\ i &= 0 \\ i &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U(S) &= 0 \\ \dot{U} &= 0 \\ u &= 0 \end{aligned}$$

国防工业出版社

电工基础

第一册

电路基础

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是在《电工基础》第一版基础上增订分册出版的。

该分册共有十三章和一个附录，分别阐述电路模型和基本定律、电路等效变换和化简、网络定理和线性电阻网络分析、非线性电阻电路、正弦电路基本概念、正弦稳态分析、三相电路、互感耦合电路、周期性非正弦电路、谐振电路、一阶电路、二阶电路、运算法、磁路和铁芯线圈。

本书对网络定理和分析方法都有较全面、深入的阐述，例题、习题也较完整。书后附有习题答案，便于自学。

本书可作高等工科院校电类专业的教材或教学参考书，也可供工程技术人员自学之用。

2536/17

电 工 基 础

第 一 册

电 路 基 础

哈尔滨船舶工程学院电工教研室 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张21¹/₈ 468千字

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷 印数：00,001—11,000册

统一书号：15034·2984 定价：4.30元

前 言

在一九七九年我室编写的《电工基础》一书中，曾增加了一些近代电路理论知识。经过几年的教学实践，发现把这些内容集中放在几章内不太理想，内容显得有些庞杂。教学过程中，实验环节也有所削弱。因此，我们认为应该改革现行的《电工基础》的课程设置，拟设立《电路基础》、《网络分析导论》和《电路实验与量计》三门课，并增设《计算机辅助分析》、《非线性电路基础》和《网络综合基础》三门选修课为宜。

这样的课程设置，各课程重点突出，体系较为合理。既能加强基础理论和实验环节；又能解决电工与物理、低频电路和信号分析等课程的衔接问题。同时还可适应各种专业的要求，选择所需课程组织教学。这个方案曾在我院电子工程系八一级和八二级试行过，效果较好。在此基础上，同时吸取广大读者对一九七九年版《电工基础》的意见，进行增订与改编。改编后的这套教材，沿用《电工基础》这一书名，但分成三册和三本选修课教材，陆续予以出版。

第一册为《电路基础》。在这一册中，凡属于电路的基本理论、基本概念及基本方法，且为大学二年级学生能够接受的内容，都尽量编入。如将对偶概念、电源移位和密勒定理、特勒根定理等内容移前；充实了对称电路和含受控源电路分析等内容；在正弦稳态分析中注意归纳问题的类型；增加了理想变压器和耦合谐振电路等内容；在一阶电路中，完

整地阐述动态电路时域分析的基本概念等等。编写时保留原书便于自学和注重选配例题、习题的特点。但提高了内容的起点，更新了大部分习题（习题难度也有所提高，数量则以每二学时课后有四至六题可供选用为限）。此外，为顾及现行教学计划的需要，保留磁路及铁芯线圈两部分内容，但编入附录。有“*”号者为非基本内容，可酌情取舍。

为便于选用，这里把第二、三册的内容简单介绍一下。第二册为《网络分析导论》，内容有：二端元件；双口网络及多端元件；网络图论；网络方程及矩阵分析；网络复频域分析及状态方程。第三册为《电路实验与量计》，内容包括两大部分，即电路实验和量计的基本知识及实验指导书。关于三本选修课教材的内容，限于篇幅，这里不作介绍。

本书由陈式据主编。参加编写《电路基础》的有：陈式据（第一、二、三章）；张保郁（第四、七章及附录）；李肇东（第五、六章）；姜钧仁（第八、九、十章）；陈哲时（第十一、十二、十三章）。由于我们水平所限，难免有错漏之处，敬希广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 电路模型和基本定律	1
§ 1-1 电路·电路图	1
§ 1-2 电路的基本变量·参考方向	4
§ 1-3 电阻元件·欧姆定律	10
§ 1-4 电压源和电流源	12
§ 1-5 电网络图的基本性质	15
§ 1-6 基尔霍夫定律	17
§ 1-7 电路的对偶性	24
本章小结	27
习题	28
第二章 电路等效变换和化简	32
§ 2-1 电阻的串联和并联	32
§ 2-2 对称电路及其分析	38
§ 2-3 电阻的星形和三角形联接	41
§ 2-4 有源电路的等效变换	49
* § 2-5 密勒定理	57
本章小结	59
习题	60
第三章 网络定理和线性电阻网络分析	66
§ 3-1 支路电流法	67
§ 3-2 网络的独立变量	73
§ 3-3 网孔电流法	78
§ 3-4 节点电压法	87
§ 3-5 受控电源 (非独立电源)	96

§ 3-6 含受控源电路的分析方法	98
§ 3-7 叠加定理	103
§ 3-8 替代定理	114
§ 3-9 戴维南定理和诺顿定理	117
§ 3-10 特勒根定理	126
§ 3-11 互易定理	131
本章小结	134
习题	136
第四章 非线性电阻电路	146
§ 4-1 非线性电阻元件的伏安特性	146
§ 4-2 非线性电阻电路方程的列写	150
§ 4-3 图解法	153
§ 4-4 线性化法	161
§ 4-5 试探法	165
§ 4-6 牛顿-拉夫逊法	167
本章小结	173
习题	174
第五章 正弦电路的基本概念	180
§ 5-1 正弦量	181
§ 5-2 正弦量的有效值及平均值	185
§ 5-3 正弦量的相量表示法	188
§ 5-4 正弦电路中的电阻元件	196
§ 5-5 电感元件	201
§ 5-6 正弦电路中的电感元件	205
§ 5-7 电容元件	210
§ 5-8 正弦电路中的电容元件	214
* § 5-9 实际器件的等效电路	219
§ 5-10 欧姆定律的相量形式	223
§ 5-11 基尔霍夫定律的相量形式	230

本章小结	234
习题	235
第六章 正弦稳态分析	244
§ 6-1 串并联电路计算举例	245
§ 6-2 复杂电路计算举例	257
§ 6-3 正弦电路的功率	267
§ 6-4 最大功率传输条件	276
本章小结	280
习题	281
第七章 三相电路	289
§ 7-1 三相电动势	290
§ 7-2 三相电路的联接	292
§ 7-3 对称三相电路的计算	301
§ 7-4 不对称三相电路的概念	306
§ 7-5 三相电路的功率	312
§ 7-6 三相功率的测量	317
本章小结	320
习题	321
第八章 互感耦合电路	326
§ 8-1 耦合线圈的互感系数及耦合系数	326
§ 8-2 耦合线圈的互感电压与同名端互感电抗	330
§ 8-3 耦合线圈的联接·去耦等效电路	338
§ 8-4 具有互感的正弦电路的分析	342
§ 8-5 空芯变压器	349
§ 8-6 理想变压器	357
本章小结	363
习题	365
第九章 周期性非正弦电路	370

§ 9-1 周期函数分解为傅里叶级数	371
§ 9-2 谐波的近似计算	380
§ 9-3 周期性非正弦电流、电压的有效值及平均功率	384
§ 9-4 周期性非正弦电路的计算	387
本章小结	393
习题	397
第十章 谐振电路	402
§ 10-1 串联电路的谐振	402
§ 10-2 串联电路的谐振曲线及通频带	408
§ 10-3 并联电路的谐振	414
§ 10-4 互感耦合电路的谐振	418
§ 10-5 互感耦合电路的谐振曲线及通频带	425
§ 10-6 滤波电路	432
本章小结	435
习题	438
第十一章 一阶电路	442
§ 11-1 动态电路的初始条件	443
§ 11-2 一阶电路的零输入响应·时间常数	449
§ 11-3 一阶电路的零状态响应	460
§ 11-4 一阶电路的全响应	473
§ 11-5 一阶电路的三要素法	480
§ 11-6 阶跃响应和冲激响应	489
§ 11-7 叠加积分	503
§ 11-8 电容电压和电感电流的跃变情况	511
本章小结	518
习题	520
第十二章 二阶电路	532
§ 12-1 RLC串联电路的零输入响应	532
§ 12-2 RLC串联电路对恒定输入的响应	547

§ 12-3 GCL并联电路	553
本章小结	557
习题	558
第十三章 运算法	562
§ 13-1 拉普拉斯变换	562
§ 13-2 展开定理	575
§ 13-3 电路定律的运算形式·运算电路图	580
§ 13-4 运算法	585
本章小结	591
习题	592
附录 磁路与铁芯线圈	596
§ 1 磁场的基本物理量	596
§ 2 磁场的基本性质及物质磁性	598
§ 3 磁路与磁路定律	602
§ 4 无分支磁路的计算	609
§ 5 对称分支磁路的计算	619
§ 6 铁芯线圈的功率损耗	620
§ 7 电流与磁通波形的畸变	627
§ 8 铁芯线圈的相量图与等效电路	633
小结	643
习题	646
习题答案	652

第一章 电路模型和基本定律

电路的应用十分广泛。电路理论已经成为一门基本学科。每一学科都有自己的一套模型、基本变量和基本定律。本章将简要地阐述实际电路的作用、组成及建立电路模型的一般概念；介绍描述电路的基本变量及其参考方向的意义；着重讨论限定电路中电流、电压分布规律的基尔霍夫定律。基尔霍夫定律和参考方向的概念，是研究一切电路的电磁现象和进行定量计算的依据和出发点，将贯穿本课程之始终。

电阻、电压源和电流源是三个常见的电路元件，利用它们便可构成某些实际电路的模型，本章将给它们以确切的定义，并论述它们的基本特性。其它电路元件将在必要时再加以介绍。

电路中存在着明显的对偶关系，掌握这一概念对分析电路非常有用，故本章也将作初步介绍。对偶概念的意义，可在今后的应用中逐渐加深理解。

§ 1-1 电路·电路图

电流流过的全部通路称为**电路**。它是由一些电的设备或器件组成的总体。图 1-1 是一个很简单的实际电路，用两条导线把灯泡和干电池联接起来形成闭合通路，便有电流在其中流动，使灯泡发光，用来照明。随着电流的流动，在电路中进行着能量的传输和转换，通常是把电能转换成光、热、声或机械等形式的能量。电路的另一作用是对电讯号进行变

换和处理，如放大、滤波、存储和记忆等。总之，在电力系统、计算机及通讯装置等电气设备中，都是利用电路来完成各种各样的任务的。

电路中提供电能或电讯号的器件，称为**电源**，如图 1-1 中的干电池。电源的电流或电压常称为激励函数或**激励**。吸收电能或输出讯号的器件称为**负载**，也有称为换能器或用电器的，如图 1-1 中的灯泡。负载上的电流或电压称为**响应**。此外，电路中还要有引导电流的**导线**。可见，电路主要是由电源、负载和导线三部分组成。实际上为了安全和使用方便起见，还要有各种控制设备，如开关和熔断器等。

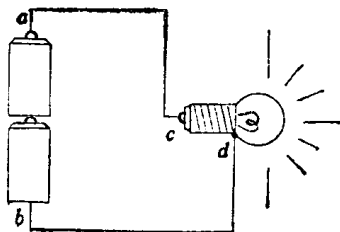


图 1-1

实际电路用途各异，种类繁多，我们不能一一列举，只能借助抽象的、理想化的模型来进行分析。电路器件中发生的物理现象，如发光、发热、辐射、作功以及电磁能量的储存或释放等等，便是建立模型的依据。电路器件的理想化模型称为**电路元件**。每一种电路元件，都可表示电路中的一种物理现象或性质。例如，**电阻元件**表示电路中消耗电磁能，具有将电能转换为其它形式能量的不可逆过程的物理现象；**电容元件**表示电场效应，即具有储存或释放电场能量的性质；**电感元件**则表示磁场效应，即具有储存或释放磁场能量的性质。能够将其它形式的能量(如化学能、机械能或太阳能等)转换为电能的元件，称为**电源元件**。上述元件都具有两个端钮，称为**二端元件**。具有两个以上端钮者，称为**多端元件**。各种元件都有规定的图形和文字符号来表示。

许多电路器件可以只用一个电路元件来表示，如图 1-1 中的灯泡，其主要作用是把电能变为光和热，故可用电阻元件来表示。干电池组可用电源元件表示，如考虑到电池组内部消耗电能的现象，就要用电源和电阻两个元件来表示。实际导线具有发热和电磁效应（详见 §5-9），应该用电阻、电感和电容等元件的组合来表示。但在直流电源作用下，一般只计及导线电阻其余可忽略。经过上面讨论，我们可以把图 1-1 的实际电路画成图 1-2(a) 的形式。图中 E 和 r_i 分别表示电池组的电动势和内阻； r_1 、 r_2 分别表示导线 ac 和 bd 的电阻； R 则表示灯泡电阻。在正常情况下，电源内阻较小，可以略去。若导线截面积足够大而长度不大，其电阻也可略去，这样就可简化成图 1-2(b) 的形式。图中 ac 和 bd 表示不吸收或不储存任何形式能量的理想导线，这种线段可以任意伸缩而不影响电路中的物理现象。于是图 1-2(b) 可进一步简化成图 1-2(c) 的形式，它明显地表示电源和电阻元件两端点对应地联接在一起，但通常为整齐起见，还是画成图 1-2(b) 的形式。

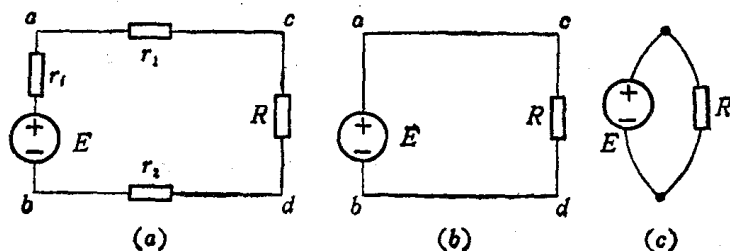


图 1-2

用电路元件表示电路器件后，便可得到实际电路的电路模型或称电路图。图 1-2 就是图 1-1 的电路图。电路图应能

正确反映实际电路中发生的物理现象和各电路器件的联接关系。如何作实际电路的电路图，是一项复杂而需要掌握多方面知识才能完成的工作。当然，模型的精确度与复杂程度有直接联系，通常只能根据具体要求来建立具有一定精确度的电路模型。除了一些较简单的情形外，本书不讨论建立电路模型问题。

电路理论的研究对象是电路图，而不是实际电路。通过对电路图的研究，认识电路的特性，掌握分析电路的一般方法，就能具有分析任一给定电路，或按任一给定特性设计电路的能力。结构较复杂的电路图的一些性质，将在 §1-5 中讨论。

电路理论是沿着电路分析和电路综合两个主要领域而发展的。电路分析是按给定的电路图和元件参数，对各部分的电流或电压进行定性分析或定量计算。或者说，对于已知参数的电路图，要求确定相应于激励的响应。相反的命题称为电路综合（或设计），就是给定激励与响应函数，要求设计相应的电路图并确定元件参数。一般来说，电路分析的解答是唯一的，而电路综合的解答通常不是唯一的。电路分析是电路理论的主要内容，也是电路综合的基础，本书只阐述电路分析的基本理论。

§ 1-2 电路的基本变量·参考方向

描述电路工作情形的物理量，如电荷、磁通、电流强度、电位、电压、电动势以及电功率和能量，称为电路的基本变量。它们的意义在物理课中已讲过，本节只作简略地复习，着重介绍这些变量的方向或极性的标记方法。即参考方向问题。

电荷的有规则运动称为**电流**。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向；电流的大小等于电荷的流动率。设 dt 时间内通过电路横截面的电荷为 dq ，则有

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

i 称为电流强度，简称电流。本书规定用小写英文字母 $i(t)$ 或 i 表示随时间变化的电流，或称为交变电流；用大写字母 I 表示不随时间变化的电流，称为恒定电流或直流电流。直流电流与电荷的关系为：

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

电荷在电场力作用下运动形成电流，但电荷本身是既不能被创造也不会被消灭的这种特性称为电荷守恒性。

电流强度的单位是安培，简称安，用 (A) 表示。对于较小的电流、则用毫安 (mA) 或微安 (μA) 做单位，它们的关系是：

$$1(A) = 10^3(mA) = 10^6(\mu A)$$

电流的大小和方向对电路的工作状态都有影响，所以在测量或计算电路的电流时，应同时给出电流的大小和方向，仅有电流数值而没有指明流向的答案是不完整的。为了表明电流的方向，可以用这段电路两个端点的符号作为下标，即双下标的标注方法。下标的次序就代表电流的方向。如图1-3为某电路中的一段电路，设其中的电流等于2A，从A点流向B点，就可记作 $i_{AB} = 2(A)$ 。但为直观起见，通常用有箭头的线段及相应的文字如 i_1 来标注此电流，即 $i_1 = 2(A)$ 。如果用箭头相反的线段及文字 i'_1 ，如图中虚线所示，则应记作 $i'_1 = -2(A)$ 。数值前的负号表示电流的实际方向与电路图中标注的方向相反。由此可见，电路图中标注的电流方向，

并不一定要与实际方向一致。为了便于区别，把电路图中标注的电流方向，称为电流的**参考方向**。在指定参考方向的前提下，电流是一个代数量。电流的实际方向是由参考方向和数值的正负来决定的，不能只看一方面。当数值为正时，电流实际方向与参考方向一致；当数值为负时，电流实际方向与参考方向相反。电流方向的这种标注方法，在分析简单电路即电流的实际方向容易直观确定的情况下，似无必要，但在分析复杂电路或电流方向随时间变化的交流电路时，由于电流的方向难以预见或者是变化的，如不指定参考方向就不能列写电路方程，也就无法分析。所以为了逐步熟悉这种标注方法，在分析简单电路时就应该开始应用。

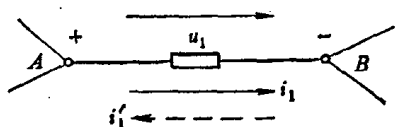


图 1-3

正电荷在电路某点上所具有的能量，称为正电荷在该点的**电位能**。电位能与电荷的比值称为**电位**。通常把电路图作为一个完整的体系，可以指定电路中任一点(只能指定一点)的电位为零，称为**电位参考点**。一般指定电路中接地或接机壳的点为参考点。指定参考点后，电位是代数量。电路中电位比参考点高者，电位值为正，低者则为负。电路中各点电位都有确定的数值，称为电位的单值性。本书用 v 或 $v(t)$ 表示电位，在直流电路中电位用大写字母 V 表示。图 1-3 中 A 、 B 点对该电路参考点的电位分别以带有下标的符号 v_A 和 v_B 表示。

电路中两点电位之差称为**电位差**或**电压**。本书用 u 或 $u(t)$ 表示电压，直流电压则用 U 表示。电压也可以用双下标的标注方法。在图 1-3 中， A 与 B 间的电压等于两点电位

之差，记作

$$u_{AB} = u_A - u_B \quad (1.3)$$

可见，若 $u_A > u_B$ ，即 A 点电位高于 B 点电位，则 u_{AB} 为正值，反之则为负值。习惯上规定下标的顺序为电压方向，所以电压方向是指电位降落的方向，故有时称电压为电位降。通常用极性（用 +、- 号表示相对极性的正负）和有箭头的线段及相应的文字来标注电压。如图 1-3 所示，用 u_1 表示这段电路的电压，其极性（或方向）如图所示，则有

$$u_1 = u_{AB} = u_A - u_B$$

电路图中电压的极性（或方向）应理解为**参考极性**（或方向）。在指定参考极性的情况下，电压也是代数量。

电位参考点和电流参考方向、电压参考极性都是任定的，不同的参考点和参考方向，并不影响它们的性质。这与力学中选定参考系和力、速度的参考方向的道理是一样的。如果一段电路上的电流、电压选取相同的参考方向，称为一致的或关联的参考方向，如图 1-3 中 u_1 与 i_1 所示。

根据电压的定义，可知电压或电位差与参考点无关。此外，电压或电位差还与计算路径无关。例如图 1-2 (a) 中 c 、 b 两点间的电压，无论沿 $cRdr_2b$ 或 cr_1r_iEb 计算，结果都是一样的。这一结论来源于静电场的无旋性，电路中的电场也有类似性质，故可引用电位的概念，且有电位差（电压）与路径无关的特性。

电源两端具有电位差或电压。电源的电位差是由局外力引起的，使得电源具有把正电荷从低电位（负端）推向高电位（正端）的能力。局外力在这过程中所做的功与正电荷的比值，定义为**电源电动势**，用 $\mathcal{E}$ 或 $\mathcal{E}(t)$ 表示，直流电源的电动势则用 E 表示。电源电动势的方向从负端指向正端，故