

高等学校工程专科教材

电路及磁路

(上册)

蔡元宇 主编

俞大光 主审

高等教育出版社



352917

高等工程专科学校教材

电 路 及 磁 路

上 册

蔡元宇 主编

俞大光 主审

高等教育出版社

(京)112号 内 容 简 介

本书根据国家教委1990年审订的《高等学校工程专科电路及磁路教学基本要求》编写,经国家教委高等学校工程专科电工基础课程教材编审小组审查通过,作为高等学校工程专科教材出版。本书以工程实践中正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主,力图基本概念清楚,理论联系实际,例题比较丰富,以体现高等工程专科的教学要求。每节末附有思考题,每章末附有习题,书末有习题答案,以培养学生掌握概念,将理论应用于实际的能力。

本书分上下两册出版。上册内容包括电路的基本概念和定律,电阻电路,正弦电流电路,互感和谐振,三相电路;下册内容包括二端口网络,非正弦周期电流电路,非线性电阻电路,磁路和铁心线圈电路,线性电路过渡过程的时域分析和复频域分析,均匀传输线等。

本书除作为高等学校工程专科强电类各专业教材外,还可供职工高等工业专科学校选用或供工程技术人员参考。

高等学校工程专科学校教材

电 路 磁 路

上 册

蔡元宇 主编

机械工业出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 10 字数 240,000

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数 0.001—2.015

ISBN 7-04-003467-0/TM·176

定价 3.80元

序 言

本教材是根据国家教委 1990 年组织制订的《高等学校工程专科电路及磁路课程教学基本要求》编写的,供高等学校工程专科电类各专业教学使用。参考学时范围为 126~144 学时(含实践性环节)。

本教材包含了有关电路及磁路的基本内容:电路的物理量和模型、电阻电路、周期电流电路、电路的过渡过程以及磁路和铁心线圈等。教材中也编入了一些供选学的内容,用小号字排版,目录上标以*号,如均匀传输线等,以供某些专业的教学需要。通过本教材的学习,要求掌握电路的基本概念、基本定律和初步分析计算方法,理解磁路的特点,会计算较简单的磁路,为学习后续课程准备必要的电路及磁路知识,并为从事本专业工作打下基础。

高等学校工程专科教育的目的是培养应用型高级专门人才,它与大学本科侧重理论研究能力的培养目标不同,而侧重于培养解决生产实际问题的能力,因而在教学中以掌握概念、强化应用为重点。基于这些想法,本书编入的内容以工程实践中正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主。同时,也要使学生对技术基础理论领域的新发展有一般了解。在编写中,力求做到基本概念清楚,理论能应用于实际,而不过分强调学科理论体系的完整性与推导论证的缜密性。本书还编入一些典型例题、思考题和适量的习题,以加深理解,提高分析问题和解决问题的能力及使用计算工具进行运算的能力。

本书的编审工作是在国家教委高等学校工程专科电工基础课程教材编审小组的主持下进行的。全书经俞大光教授主审,张洪

让、韩继生、刘琴芳、郭辉、张铁岩以及高教出版社电工编辑室的楼史进、崔万胜等同志参加了审稿会议，他们对提高本书质量作出了贡献。本书经编审小组审定为全国通用教材。参加本教材编写工作的有：蔡元宇（第一至第五章、第十二章）、陈永祥（第十、十一章）和杨其允（第六章至第九章）同志。蔡元宇同志任主编。限于编者水平，错误和不恰当之处在所难免，请广大读者提出宝贵意见，以便再版时修订。

编者

1990年7月

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电路的主要物理量	4
§ 1-3 电阻元件和欧姆定律	13
§ 1-4 电压源	18
§ 1-5 电流源	23
§ 1-6 基尔霍夫定律	26
习题	35
第二章 电阻电路的分析	39
§ 2-1 电阻的串联、并联和串并联	39
§ 2-2 电阻的三角形联接与星形联接的等效变换	48
§ 2-3 电源模型的等效变换和电源支路的串并联	52
§ 2-4 支路分析法	60
§ 2-5 网孔分析法	64
§ 2-6 节点分析法	69
*§ 2-7 电路的图和树的概念	76
*§ 2-8 回路分析法	80
§ 2-9 叠加定理	83
§ 2-10 替代定理	88
§ 2-11 戴维南定理和诺顿定理	90
§ 2-12 受控源	102
§ 2-13 含受控源电路的分析计算	106
习题	114
第三章 正弦电流电路	123
§ 3-1 正弦量	124
§ 3-2 复数	133
§ 3-3 正弦量的相量表示法	137

§ 3-4	正弦电流电路中的电阻	144
§ 3-5	电感元件及正弦电流电路中的电感	147
§ 3-6	电容元件及正弦电流电路中的电容	156
§ 3-7	电阻、电感、电容的串联及阻抗	166
§ 3-8	电阻、电感、电容的并联及导纳	171
§ 3-9	基尔霍夫定律的相量形式	175
§ 3-10	负载及实际元件的电路模型	177
§ 3-11	阻抗的串并联	182
§ 3-12	正弦电流电路中的功率	188
§ 3-13	功率因数的提高	202
§ 3-14	复杂正弦电流电路的计算	205
	习题	213
第四章	互感和谐振	222
§ 4-1	互感和互感电压	222
§ 4-2	具有互感的正弦电流电路	231
*§ 4-3	空心变压器	241
§ 4-4	串联电路的谐振	246
§ 4-5	并联电路的谐振	254
	习题	260
第五章	三相电路	263
§ 5-1	三相电源和三相负载	263
§ 5-2	对称三相电路的计算	276
§ 5-3	具有静止负载的三相电路的不对称情况的计算	281
§ 5-4	三相电路的功率	289
*§ 5-5	三相电压和电流的对称分量	296
	习题	302
附 录	用计算器进行复数运算	306
	习题答案	308

第一章 电路的基本概念和定律

本章介绍电路和电路模型、电路的主要物理量,引进了电流、电压的参考方向的概念,研究反映电阻、电源等元件性质的基本规律(元件约束)和反映元件连接特性的基本规律——基尔霍夫定律(拓扑约束)。这些都是本书的重要基础知识,贯穿全书。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

电路是指电流的通路,它是为了某种需要由一些电气器件按一定方式连接起来的。比较复杂的电路呈网状,常称为网络。实际上,电路与网络这两个名词并无明确的区别,一般可以通用。

电路的组成方式很多,功能也各不相同,其中一种作用是实现电能的传输和转换。例如各种电力电路便是如此。图 1-1a 是一个简单的实际电路,它由于电池、开关、小灯泡和连接导线等电气器件组成。当开关闭合后,在这个闭合的通路中,便有电流通过,于是小灯泡发光。干电池是一种电源,在其正负极间能保持给定的电压,向电路提供电能;小灯泡是一种用电设备,在电路中称为负载(有时也叫负荷),它实际上是一个电阻器,由电阻丝制成,电流通过时能发热到白炽状态而发光;开关及连接导线可使电流构成通路,为传输环节。

电路的另一种作用是实现信号的传递和处理。常见的例子如扩音机,将传声器(话筒)施加的信号经过放大器的放大,送到扬声器输出。传声器施加的电信号称为激励,它相当于电源;扬声器得到的放大信号称为响应,它相当于负载。由于传声器施加的信号

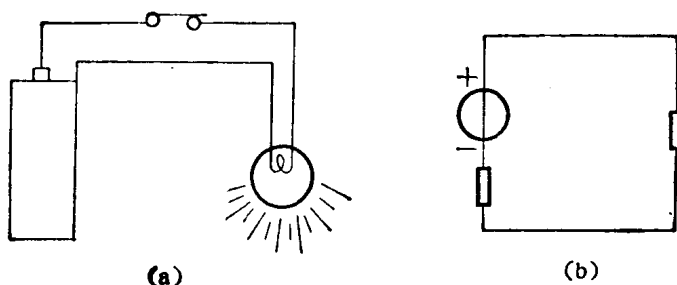


图 1-1 一个简单的实际电路及其电路模型

比较微弱，不足以推动扬声器发音，因而采用传输环节对信号起传递和放大作用。

由此可见，电路主要由电源、负载和传输环节等三部分组成；电源是提供电能或电信号的设备；负载是用电或输出信号的设备；传输环节用于传输电能和电信号。

二、理想电路元件

组成电路的实际电气器件往往比较复杂，其电磁性能的表现可能是多方面交织在一起的。但在研究时，为了便于分析，常常在一定条件下对实际器件加以理想化，只考虑其中起主要作用的某些电磁现象，而将其它现象忽略，或者将一些电磁现象分别表示（这样作所得结果与实际情况相差不大，在工程上是允许的）。例如在图 1-1a 的例子中，电阻器（小灯泡）不但发热而消耗电能，并且在其周围还会产生一定的磁场，但是可以只考虑其消耗电能的性能而忽略其磁场；电源（干电池）不但在其正负极间能保持有给定的电压对外部提供电能，而其内部也有一定的电能损耗（消耗电能），可以将其提供电能的性能与内部电能损耗分别表示；对闭合的开关和较短的导线则只考虑导电性能而忽略其本身的电能损耗。

如上所述，在一定的条件下，我们用足以反映其主要电磁性能的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。理

理想电路元件是一种理想化的模型,简称为电路元件。每一种电路元件都只表示一种电磁现象,各具有某种确定的电磁性能和精确的数学定义。我们认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的,所以在任何时刻,从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流恒等于从另一端钮流出的电流,并且元件两个端钮间的电压值也是完全确定的。凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集中参数元件或简称集中元件。例如:电阻元件是一种只表示消耗电能(转换为热能或其它形式能量)的元件,电感元件是反映电路周围存在着磁场而可以储存磁场能量的元件;电容元件是反映电路及其附近存在着电场而可以储存电场能量的元件等。因为电阻元件消耗电能,电感元件或电容元件不会释放出多于它所吸收或储存的能量,这些元件又叫做无源元件。

这样,在图 1-1a 中,将电阻器(小灯泡)用电阻元件来表示,而将电源(干电池)用电压源元件和电阻元件来表示。电压源元件及以后将介绍的电流源元件合称为有源元件,它们也是理想电路元件。

上述这些电路元件通过引出端互相连接。对具有两个引出端的元件,称为二端元件;对具有两个以上引出端的元件,称为多端元件。

三、电路模型

闭合的开关和较短的导线,在忽略电能损耗的情况下,可看作为理想导体。实际电路可以用一个或若干个理想电路元件经理想导体连接起来模拟,这便构成了电路模型。图 1-1b 便是图 1-1a 的电路模型。这种电路模型是集中参数元件构成的,故称为集中参数电路。本书第十一章以前各章讨论的都是集中参数电路,分布参数电路(或称为具有分布参数的电路)将在第十二章中介绍。

实际器件和电路的种类繁多,而理想电路元件只有有限的几种,用理想电路元件建立的电路模型将使电路的研究大大简化。建立电路模型时应使其外部特性与实际器件和电路的外特性尽量接近,但两者的性能并不一定也不可能完全相同。同一器件或电路在不同条件下有时应以不同的电路模型来表示。例如,一个线圈在低频率时可以只考虑其中的磁场和耗能,甚至只考虑磁场就可以了,但当频率较高时则应考虑电场的影响,频率甚低或通过定值电流时就只需考虑耗能了。一般地说,对电路模型的近似程度要求越高,电路模型也越复杂,但是为了分析方便,又希望电路模型尽量简单。所以建立电路模型一般应指明它们的工作条件(如频率、电压、电流、功率和温度范围等)。

在电路理论中,我们研究的是由理想化元件所构成的电路模型,研究它们的一般性质。借助于这种理想化的电路模型来分析和研究实际电路。无论简单的还是复杂的实际电路都可以通过理想化的电路模型充分地描述,理想化的电路模型也简称为电路。

思 考 题

- 1-1-1 电路的主要作用是什么? 什么叫电源、负载、激励和响应?
- 1-1-2 什么叫理想电路元件? 集中参数元件?
- 1-1-3 电路模型是如何构成的? 建立电路模型时应注意些什么?
- 1-1-4 电路理论研究的主要对象是什么?

§ 1-2 电路的主要物理量

一、电流及其参考方向

带电粒子(电子、离子等)的有秩序运动形成电流。电流是一种物理现象,又是一个表示带电粒子有秩序运动的强弱的物理量。电流在量值上等于穿过某一面积的电荷与所需时间之比。它实际

是电流强度的简称,用符号 i 表示,即

$$i \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dq}{dt} \text{ ①} \quad (1-1)$$

式中 dq 是在极短时间 dt 内通过导体截面的电荷。

当电流的量值和方向不随时间变动时,即 dq/dt 等于定值,则这种电流称为直流电流,简称为直流(DC)。直流的电流常用大写的字母 I 表示,所以式(1-1)可改写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中 q 是在时间 t 内通过导体截面的电荷。

周期性变动且平均值为零的电流称为交流电流^②,简称为交流(AC)。

本书中物理量采用国际单位制(SI)单位。电流的SI主单位是安[培]^③,符号为A。每秒内通过某一面积的电荷为1库[伦](符号为C)时,则电流为1安。将电流的主单位冠以SI词头(见表1-1)即可得到电流的十进倍数单位和分数单位,常用的有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等。

表 1-1 SI 词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	百	十	分	厘	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向(实际方向)。电流的方向是客观存在的,但在分析较为复杂的电路时,往往难于事先判定某电流支路中电流的实际方向;对交流量来讲,其实际方向

① 符号 def 表示“按定义等于”。

② 详见第三章。

③ 本书文字中方括号内为可以省去的字,省去后为简称。

随时间而变,也无法用一个固定方向来表示它的实际方向。为此,在分析与计算电路时,常可任意规定某一方向作为电流的参考方向或正方向,用箭头表示在电路图上。规定了参考方向以后,电流就是一个代数量了,若电流的参考方向与实际方向一致(图 1-2a),则电流为正值;如两者相反(图 1-2b),则电流为负值。这样,就可以利用电流的参考方向和正负值来表明电流的实际方向。应当注意,在未规定参考方向的情况下,电流的正负号是没有意义的。

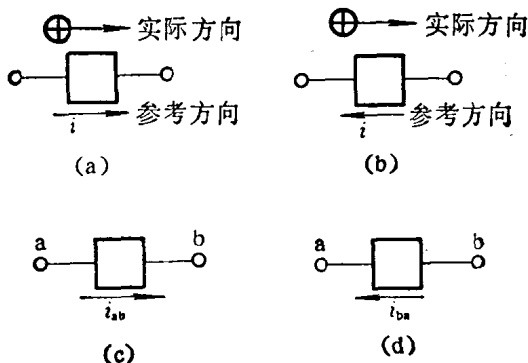


图 1-2 电流的参考方向

电流的参考方向除用箭头在电路图上表示外,还可用双下标表示,如对某一电流,用 i_{ab} 表示其参考方向由 a 指向 b(图 1-2c),用 i_{ba} 表示其参考方向由 b 指向 a(图 1-2d)。显然,两者相差一个负号,即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-3)$$

二、电压、电位、电动势及其参考方向

先讨论电压。当导体中存在电场时,电荷将在电场力的作用下运动,并把电能转换为其它形式的能量。电路中 a、b 两点间的电压 u_{ab} 表明了单位正电荷在电场力作用下由 a 点转移到 b 点时所减少的电能,即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

式中 dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷, dW 为转移过程中电荷所减少的电能。

再讨论电位。若任取一点 o 作为参考点, 则由某点 a 到参考点 o 的电压 u_{ao} 称为 a 点的电位 V_a 。电位参考点可以任意选取, 常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。在一个连通的系统中只能选择一个参考点。参考点电位为零。

电压与电位的关系为: a 、 b 两点之间的电压等于这两点电位之差, 即

$$u_{ab} \stackrel{\text{def}}{=} V_a - V_b \quad (1-5)$$

式中 V_a 为 a 点电位, V_b 为 b 点电位。所以, 电压和电位差一般可以认为意义相同, 知道电路上各点电位后, 便可求得各段的电压。电位的量值与参考点的选择有关, 在电路上选定参考点后, 也可由电路各段电压求得电路各点的电位。例如图 1-3 中, 已知 $u_{ab}=5\text{ V}$, $u_{bc}=3\text{ V}$, 若选 o 点为参考点, 则 $V_o=0\text{ V}$, $V_b=V_o+u_{bc}=3\text{ V}$, $V_a=V_b+u_{ab}=8\text{ V}$ 。

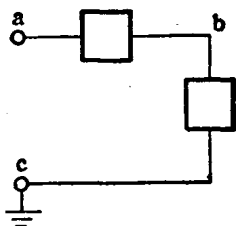


图 1-3 电位的计算

电压既表明单位正电荷在电场力作用下转移时所减少的电, 减少电能体现为电位的降低(从高电位点到低电位点), 所以电压的实际方向是电位降低的方向。

下面再讨论电动势。在电场力作用下, 正电荷一般总是从高电位点向低电位点运动。为了形成连续的电流, 在电源中正电荷必须从低电位点移到高电位点。这就要求在电源中有一个电源力作用在电荷上, 使之逆电场力方向运动, 并把其它能量转换成电能。例如在发电机中, 当导体在磁场中运动时, 导体内便出现这种

电源力;在电池中,电源力存在于电极之间。电动势 e 表明了单位正电荷在电源力作用下转移时所增加的电能,即

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_s}{dq} \quad (1-6)$$

式中 dq 为转移的电荷, dW_s (下标 s 表示电源) 为转移过程中电荷所增加的电能。

在电源中,电动势表明单位正电荷在电源力作用下转移时所增加的电能,增加电能体现为电位的升高(从低电位点到高电位点),所以电动势的实际方向是电位升高的方向。

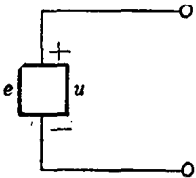


图 1-4 电源的电动势和电压

对于一个电源,如果用正(+)极性表示其高电位端,用负(-)极性表示其低电位端,如图 1-4 所示。则电动势 e 的实际方向是从负极性指向正极性,而电压 u 的实际方向是从正极性指向负极性,两者刚好相反。由能量守恒定律得知:若不考虑电源内部还可能有其它形式的能量转换,则电源电动势 e 在量值上应当与其两端间的电压 u 相等。当电源不与其它元件连接时,电源中没有电流,因而电源内不存在能量转换。这时电源处于开路状态。显然,电源开路时的电压在量值上等于电动势。

按电压和电动势随时间变化的情况,它们可分为直流的与交流的。如果电压和电动势的量值与方向都不随时间而变动,则称为直流电压和电动势,分别用符号 U 和 E 表示。

电压、电位、电动势的 SI 主单位都是伏[特],符号为 V。当 1 库[伦]的电荷在电场力或电源力作用下由一点转移到另一点所转换(减少或增加)的电能为 1 焦[耳](J)时,则该两点间的电压或电动势为 1 伏,其十进倍数和分数单位常用的有千伏(kV)和毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

与电流类似,在分析与计算电路时,把电压、电动势看作是一个具有正负值的代数量,也必须事先规定它们的参考方向或正方向。参考方向可任意规定,一般有三种表示的方式:

(1) 采用正(+)、负(-)极性来表示,称为参考极性,如图 1-5a 所示。这时正极指向负极的方向就是电压的参考方向,负极指向正极就是电动势的参考方向。

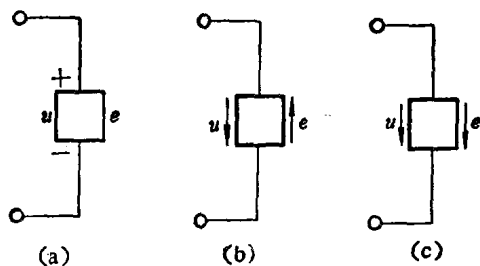


图 1-5 电压和电动势的参考方向

(2) 采用箭头来表示。对一个处于开路状态的电源设备来说,因为它的电动势与电压方向相反而量值相等,当用箭头表示参考方向时,若选择电动势和电压的箭头方向相反,如图 1-5b 所示,则有 $e=u$; 若选择电动势和电压的箭头方向相同,如图 1-5c 所示,则有 $e=-u$ 。

(3) 采用双下标表示。如 u_{ab} 表示电压的参考方向由 a 指向 b; e_{ba} 表示电动势的参考方向是由 b 指向 a。

分析电路时,首先应该规定各电流、电压的参考方向,然后根据所规定的参考方向列写电路方程。不论电流、电压、电动势等物理量是直流还是交流,它们均是根据参考方向写出的。参考方向可以任意规定而不影响计算结果,因为参考方向相反时,解出的电流、电压值也要改变正负号,最后得到的实际结果仍然相同。

任一电路的电流参考方向和电压参考方向可以分别独立地规

定。但为了分析方便,常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,即电流从电压的正极性端流入该元件而从它的负极性端流出。这时,该元件的电压参考方向与电流参考方向是一致的,称为关联参考方向(图 1-6)。

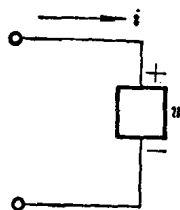


图 1-6 电压和电流的关联参考方向

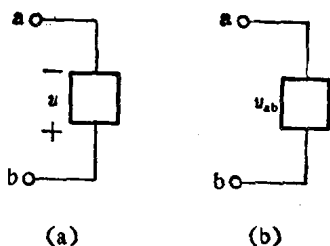


图 1-7 例 1-1 电路

例 1-1 图 1-7a 中 $u=7\text{ V}$; 图 1-7b 中, $u_{ab}=-4\text{ V}$, 试分别比较 a、b 两点电位。

解 图 1-7a 中参考极性 b 点为正, a 点为负, $u=7\text{ V}$, 所以 b 点电位比 a 点高 7 V 。

图 1-7b 中, u_{ab} 为 a 点到 b 点的电位降, $u_{ab}=-4\text{ V}$, 所以 a 点电位比 b 点低 4 V 。

三、电功率和电能

在电路中,正电荷 dq 受电场力作用从高电位点 a 流向低电位点 b, 设 ab 间电压为 u , 则根据式 (1-4) 可知在转移过程中 dq 减少的电能为

$$dW = u dq \quad (1-7)$$

减少电能, 意味着电能转换为其它形式的能量, 被电路吸收(消耗)。电能转换的速率称为电功率(简称为功率)。功率 p 和电能 W 以及电路中电压、电流的关系是

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-8)$$