

中等专业学校试用教材

电工基础

上册

谭恩鼎 主编



高等教育出版社

TM1
3162:1

中等专业学校试用教材

电 工 基 础

上 册

谭恩鼎 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部一九八一年十月颁发的中等专业学校工科电工类专业通用的《电工基础教学大纲(试行草案)》编写的,可作为中等专业学校电工类专业的试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

全书分上、下两册出版。上册内容有电路的基本概念和基本定律、直流电路的分析、正弦交流电路的基本概念、符号法、互感电路、三相正弦交流电路、二端口网络、非正弦周期电路和非线性电阻电路;下册包括线性电路的过渡过程、网络分析与网络方程、均匀传输线、磁路和电磁场。每章均有引言和结束语,节后有小结。选编的练习题、习题较多,供选用。书末附有习题答案。

中等专业学校试用教材

电 工 基 础

上 册

谭恩鼎 主编

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 18.25 字数 438,000

1985年5月第1版 1985年5月第1次印刷

印数 00,001—25,200

书号 15010·0610 定价 3.25元

序 言

本书是根据一九八一年十月教育部组织制定的中等专业学校工科电工类《电工基础教学大纲(试行草案)》编写的,供中等专业学校有关专业试用。

《电工基础》是电工类专业的技术基础课。它的任务是阐明电工技术中电磁现象的基本概念、基本规律和基本分析方法,为学习专业课程打下基础。

本书分上下册共十七章。上册一至九章全部为电路内容,即第一、二章直流电路,第三、四章单相交流电路,第五章互感电路,第六章三相电路,第七章二端口网络,第八章非正弦周期电路与第九章非线性电阻电路。下册计八章,除第十章过渡过程是电路的内容外,第十一、十三、十五等三章分别为静电场、恒定磁场和磁路与铁心线圈。根据教学大纲规定,为了适应新技术的发展以及不同专业的需要,还编写了恒定电流场(第十二章),交变电磁场(第十四章),网络分析与网络方程(第十六章),均匀传输线(第十七章),均标以*号,供选用。

由于电工技术内容非常广泛,根据本课程的性质与任务,本书把重点放在电工技术的基本原理和分析计算方法上。编写中始终强调物理模型、数学模型和等效的概念,以逐步培养学生对复杂的实际问题的概括、简化和将原理、定律用来解决实际问题的能力。

学习本书的基础是高中物理和必需的高等数学,或与之相应的中专物理和中专数学。在编写中注意了衔接问题。在基本概念方面,需要复习一些物理中已学过的知识,并从电工技术方面予以引伸,避免不必要的重复。对数学的配合上可能出现的困难,需要

采取措施,例如先阐明物理概念,以后再进行数学运算。

为了便于学生阅读,本书对概念的叙述比较详细,并力求深入浅出,例题也比较多些,因而建议有些内容在课堂上可以少讲或不讲,以培养学生的自学能力。

每章的引言,节后的小结,章后的结束语,仅仅希图理清一下思路,以利于教学。节后所附练习,以巩固所学概念为主,计算比较简单,一般可作复习提问使用。每一章后选编了数量较多的习题,供选作课外作业。

参加本书编写的有上海电机制造学校谭恩鼎、湘潭机电专科学校周伯孚、哈尔滨机电专科学校杨其允、刘庆田四位同志,由谭恩鼎主编。其中第一至第七章和第十四章由谭恩鼎执笔,第十一、十二、十三、十五和第十七章由周伯孚执笔,第八、九章和第十六章由杨其允执笔,第十章由刘庆田执笔。

本书承重庆大学彭扬烈同志初审,江泽佳同志主审。上册经一九八三年七月上海闵行审稿会议,下册经一九八四年四月重庆审稿会议讨论通过。参加审稿会的还有吉林冶金电气化学校,西安航空工业学校,南京机电学校,上海机电工业学校,沈阳机电工业学校,郑州机械专科学校,北京机械工业管理专科学校,重庆机器制造学校,福建机电工业学校和上海电机制造学校的教师代表。他们提供了许多宝贵意见,对修改起了重要的作用。在编写、审稿过程中,还得到重庆大学、编者所在三所学校的大力支持。上海电机制造学校的袁兆熊等许多同志在组织和抄写、打印、绘图等方面做了大量的工作付出了辛勤劳动。编者在此谨致以深切的谢意。

由于编者水平限制,书中不妥和错误之处可能不少,恳切希望使用本书的师生和其他读者指正。

编 者

一九八四年四月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
§1-1 电路·电路图	1
§1-2 电路的基本物理量	3
§1-3 欧姆定律·电阻	15
§1-4 电气设备的额定值	24
§1-5 基尔霍夫定律	28
§1-6 电路中各点电位的计算	39
§1-7 电压源与电流源	44
习题	55
第二章 直流电路的分析	62
§2-1 电阻的串并联	62
§2-2 电能输送与负载获得最大功率的条件	74
§2-3 支路电流法	82
§2-4 回路电流法	87
§2-5 节点电压法	95
§2-6 星形网络与三角形网络的等效互换	103
§2-7 叠加定理与置换定理	108
§2-8 戴维南定理与诺顿定理	118
习题	131
第三章 正弦交流电路的基本概念	141
§3-1 正弦交流电动势的产生	141
§3-2 正弦量的三要素	148
§3-3 正弦量的有效值	154
§3-4 同频率正弦量的相加·旋转相量	159
§3-5 正弦交流电阻电路	167
§3-6 电感	172
§3-7 正弦交流电感电路	178

§3-8 电容	184
§3-9 正弦交流电容电路	189
§3-10 电阻电感电容串联电路	194
习题	205
第四章 符号法	211
§4-1 复数	211
§4-2 复数的运算	216
§4-3 正弦量的复数表示法	224
§4-4 复数形式的欧姆定律与基尔霍夫定律	227
§4-5 电导、电纳和复导纳	233
§4-6 复阻抗与复导纳的相互转换	237
§4-7 阻抗的串并联电路	240
§4-8 复功率	253
§4-9 功率因数的提高	257
§4-10 电路的谐振	264
§4-11 交流复杂电路	277
§4-12 交流电路中的实际元件	288
习题	295
第五章 互感电路	309
§5-1 互感	309
§5-2 互感电路的计算	321
§5-3 互感消去法	342
§5-4 空心变压器	342
§5-5 受控源	348
习题	356
第六章 三相正弦交流电路	362
§6-1 三相交流电动势的产生	362
§6-2 三相电源的联接	364
§6-3 三相负载的联接	369
§6-4 对称三相电路的计算	374
§6-5 不对称三相电路的计算	385

§6-6 三相电路的功率	398
*§6-7 三相旋转磁场	405
*§6-8 对称分量法	414
习题	425
第七章 二端口网络	431
§7-1 二端口网络	431
§7-2 二端口网络的方程和参数	432
§7-3 二端口网络的特性参数	446
§7-4 无源二端口网络等效电路	456
习题	461
第八章 非正弦周期电路	464
§8-1 非正弦周期量的产生	464
§8-2 非正弦周期函数分解为傅里叶级数	467
§8-3 几种对称的周期函数	474
§8-4 有效值、平均值和平均功率	485
§8-5 非正弦周期电路的计算	495
§8-6 滤波器的概念	505
§8-7 三相电路中的高次谐波	512
习题	527
第九章 非线性电阻电路	532
§9-1 非线性电阻元件的伏安特性	532
§9-2 非线性电阻电路的图解法	536
§9-3 非线性电阻电路的解析法	547
习题	553
习题答案	557

第一章 电路的基本概念和基本定律

电路是电工技术中的主要研究对象,电路理论是电工基础的主要部分,内容非常丰富。本章首先对什么是电路,电路中的电流、电压、电功率三个基本物理量,电路中的重要参数之一电阻,以及电路中的基本定律进行研究,为以后各章深入分析电路问题打下基础。

§ 1-1 电路·电路图

近代的电气工程 (electrical engineering) 包括电力工程、通讯、控制三大系统。电工基础是整个电气工程的基础,研究的是整个系统电磁现象的基本规律及其应用,而电路理论在电工基础中又占有很大的比重。

为了研究电路理论,首先要了解什么是电路,即先给电路下一个定义:电路 (electric circuit, 简称 circuit) 是各种电气器件 (electrical device) 按一定方式联接起来组成的总体,它提供了电流通过的路径。这些电气器件包括发电机、电池、电动机、电炉、电灯、电子管、半导体器件、集成电路块、控制电器等等。它们的结构、原理将在有关专业的书籍中介绍。

电路的另一名称叫电网络 (electric network)。两个名词可以通用,不过,一般电网络指复杂些的电路。

按工作任务划分,电路的功能有两类:

第一类功能是进行能量的转换、传输和分配。其中包括将其他能量转变为电能的设备如发电机、电池等,这些设备叫电源 (electric source); 将电能转变为其他能量的设备如电动机、电炉、电灯等,叫做负载 (load)。而在电源和负载之间的变压器、输电线、

控制电器便是执行传输和分配任务的器件。这些设备构成极其复杂的电网络,称为电力系统。

第二类功能是信号(signal)的处理。输入的信号叫做激励(excitation),输出的信号叫响应(response)。中间部分便是对信号进行处理的一些器件。例如扩音机的输入(激励)是声的电信号,通过电子管或晶体管组成的放大器,输出(响应)便是放大的声的电信号,实现了放大功能。又如程序控制器,它的激励是手动控制器,或者用穿孔纸带转变为光信号的一系列脉冲指令,经过中间电路的处理加工,发出一系列信号(响应),使电动机按指令要求带动机床动作,就是自动控制的一个例子。

电路可以是简单的,也可能是复杂的。有时会复杂到难以想象的程度。即使是最简单的电路,实际工程中的电气器件牵涉到的知识也很广泛。我们只对电路中的一些规律进行探讨,按照所掌握的规律进行分析。

因此,我们把实际的电气器件看作为电源、电阻、电感与电容等有限几种理想的电路元件(circuit element),用这些元件构成物理模型,进行数学上的分析,或者说建立数学模型。当然这与工程实际器件构成的电路性能会有差异,正象研究自由落体的质点模型,会与实际有空气阻力的落体有差异一样。这些差异不容忽视,但只有掌握了基本规律之后,才有可能去考虑差异。

用理想元件构成的电路的物理模型叫电路模型,用特定的符号代表元件联接成的图形叫电路图(circuit diagram)。

一般的理想元件具有两个与外部联接的端钮,叫二端电路元件(two-terminal circuit element)。没有说明具体性质的二端电路元件用方框符号表示[图 1-1-1(a)],它只表示抽象的一般二端电路元件。

图 1-1-1(b)的符号代表电池,长线代表正极,短线代表负极,

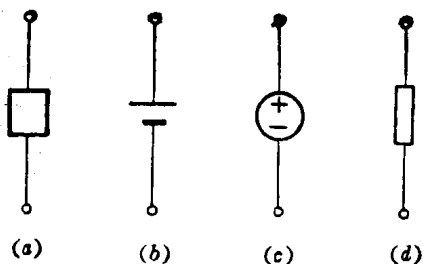


图 1-1-1

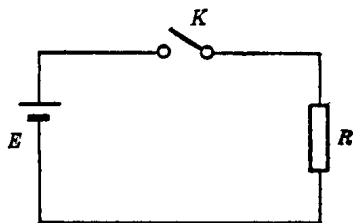


图 1-1-2

可以不另外加正负号。对于一般的电源用圆圈内加正负号表示[图1-1-1(c)]。图1-1-1(d)长方形符号代表理想电阻元件，白炽灯、电炉、电烙铁都是电阻元件。

图1-1-2是一个最简单的电路图(以后只简称为电路)。它由一个电池作为电源供电，负载是一个电阻元件，中间是一个控制电路接通或断开的开关。

其他类型二端元件如电感、电容，三端元件如晶体管，以及由此组成的电路，放在以后研究。

§ 1-2 电路的基本物理量

为了定量地分析研究自然界物理现象与规律，需要引进很多物理量，但基本的只有七个(长度、质量、时间、电流、温度、物质的量、光强)。在电路中需要分析研究的物理量也很多，但基本的也只有电流^①、电压、电功率三个物理量。

电工中的基本物理量，是从物理学的基本物理量引伸出来的。所以对电路来讲，电流、电压、电功率是基本的物理量，对整个物理学而言只有电流是基本的。

关于单位制，我国已于1981年8月规定统一用国际单位制

① 有的书以电荷为基本物理量。

(按原文缩写为 SI)。在国际单位制中,电磁学采用四基本量单位制,即长度用米(m),质量用千克(kg),时间用秒(s),电流用安(A)作为基本单位。严格的单位定义,要在对物理概念与规律深入理解之后,才能规定。例如,电流单位安培的标准定义,要学习到第十二章才能确定。

除了基本单位之外,根据实际情况,需要使用较大单位或较小单位时,则在原单位上加词头。例如:大的长度用千米(km),小的用毫米(mm),或微米(μm)。常用的词头如表 1-1 所示。以后讨论电工中的单位时,只研究基本单位。需要采用大或小的单位时,可按表加上词头。

表 1-1

因 数	词 头	代 号		因 数	词 头	代 号	
		中文	字母			中文	字母
10^6	兆 méga	兆	M	10^{-2}	厘 centi	厘	c
10^3	千 kilo	千	k	10^{-3}	毫 milli	毫	m
10^2	百 hecto	百	h	10^{-6}	微 micro	微	μ
10^1	十 déca	十	da	10^{-12}	皮可 pico	皮	p

下面分别研究电流、电压、电功率几个物理量。

(一) 电流(electric current)

带电质点有规则的运动形成电流。在金属导体中,能够自由运动的是带负电的自由电子,它们在电场作用下,逆着电场方向作有规则的运动,便形成电流。实际上,金属导体中,电子运动的情况很复杂。自由电子除了作有规则的运动外,一般还作无规则的热运动,只是从统计的观点看,作热运动的电子取任一方向的几率都相等,所以不形成电流。关于金属导体导电的物理过程,我们不详细讨论。在电解液(例如硫酸铜溶液)中,带电质点是带正电和带负电的正负离子,在电场作用下,分别向两个方向有规则地运

动，都形成电流。这种金属导体、电解液中的电流叫传导电流 (conduction current)。之所以给它一个专门名词，说明还有其他类型的电流，以后再进行讨论。

表征电流强弱的物理量叫电流强度 (current intensity)。上面所说的电流仅仅是物理现象，但长期以来，往往把电流强度也简称为电流。这样一来，“电流”一词，有时指物理现象，有时指物理量。

电流强度在数值上等于单位时间内通过导体某一任意截面电荷的代数和。图 1-2-1 表示一段圆柱金属导体，其中取一个截面 S ，单位时间内通过截面的自由电子所带电荷总数便是电流强度。

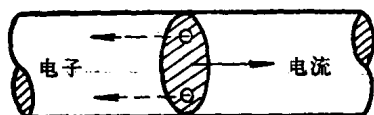


图 1-2-1

根据电流强度和电荷的这个关系，电流强度为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2-1)$$

注意，这里的 dq 是 dt 时间内通过截面 S 的电荷总数。关于电流的方向，在十八世纪发现电的现象时，对它的本质还毫无所知，只能提出一些假说，设想电流是带正电的质点运动，电流的方向规定为正电荷运动的方向，一直沿用至今。所以在图 1-2-1 中，电子运动的方向与电流的方向相反。

对于电解液导电，参加导电的是正负离子，它们都形成电流，但正离子运动方向与电流方向相同，负离子运动方向与电流方向相反， dt 时间内通过截面 S 的电荷总数是 $dq(dq_+ + dq_-)$ 。

采用国际单位制(SI)，电流的单位是安培(ampere)，简称安，其国际符号为 A。计算大电流时(如发电厂、大型工厂)用千安(kA)

作单位，计算小电流时(电子线路中)用毫安(mA)或微安(μA)作单位。

由基本单位安培可以导出电荷的单位库伦 (coulomb)，简称库，其国际符号为 C。当通过导体的电流是 1 A 时，则 1 s 通过导体某一截面的电荷便是 1 C。

式(1-2-1)中，电流 i 和电荷 q 都是时间函数[有些教材记为 $i(t), q(t)$]。电流 i 可能有各式各样的变化，图 1-2-2 画出一些例子。

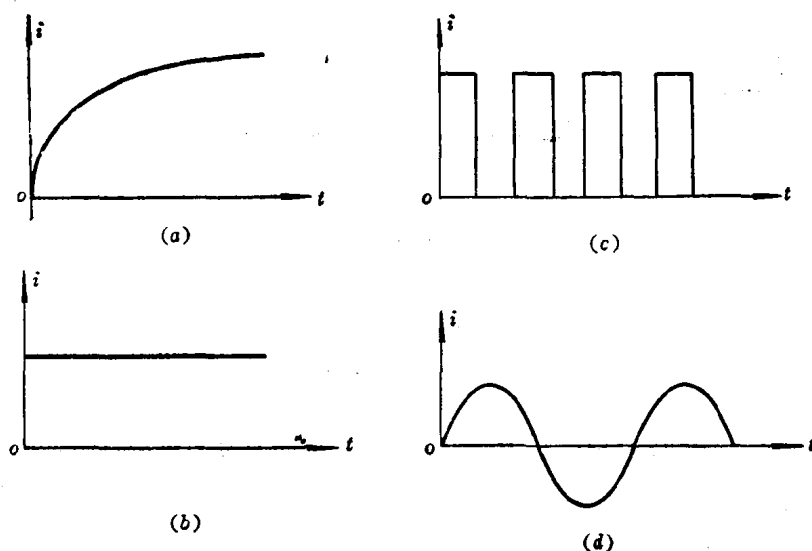


图 1-2-2

图 1-2-2(b)的 $i-t$ 曲线是与 t 轴平行的直线，即电流是恒定的，叫恒定电流，也叫直流电流(direct current)，简称直流(dc 或 DC)。

对于直流电流，单位时间内通过截面的电荷是恒定不变的

$$I = \frac{q}{t}$$

这里用大写字母 I 代表恒定电流，以区别于小写字母 i 代表的变化电流。在这本书里，我们对其他物理量一般也用大写字母代表恒定量，用小写字母代表变动的量。如有例外，我们将加以说明。式中的 q 是 t 秒钟内流过截面的电荷的累计数，仍然是时间函数，所以仍应用小写字母。

(二) 电压、电位、电动势

要在电路中形成电流，必须有一电场力相作用。以电池为例，由于化学作用，在电池两端积累有一定数量的正负电荷，分别标为电池的正负极。当金属导体（例如手电筒的小电珠）与电池联接时，电池正负极上积累的正负电荷在导体中形成电场，正电荷受电场力作用通过导体由正极移向负极，形成电流（实际是自由电子由负极移向正极），图 1-2-3 是它的电路模型。这样在图中，电场力将正电荷通过电阻元件（电珠）由正极 a 移动到负极 b ，即电场力对正电荷作了功 A_{ab} 。电场将单位正电荷自 a 点移动到 b 点所作的功定义为 a 、 b 两点间的电压 (voltage)

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-2-3)$$

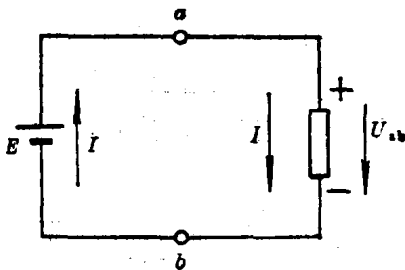


图 1-2-3

电压总是指两点之间而言，所以用双下标 ab 表示，前一个下标 a 代表起点（正电荷运动的起点），后一个下标 b 代表终点。电压的方向则由起点指向终点。也有的用箭头在图上标明，或在起

点标以正号,终点标以负号。

电压是一代数量,当正电荷顺电场方向由 a 点移向 b 点,电场力作正功, $U_{ab} > 0$; 逆电场方向由 a 点移向 b 点,电场力作负功(外力做功),则 $U_{ab} < 0$ 。在图 1-2-3 中,电阻元件上(称为外电路), $U_{ab} > 0$ 。在电源内部(称为内电路),两极上正负电荷的积累是由外力(也有的称局外力)的作用建立的,这积累的电荷在电源内部也形成电场。电场力与外力方向相反,数值相等,达到平衡。当电源向外部供应电流时,两极上积累的正、负电荷减少,电场力减弱,外力便不断推动电荷予以补充,达到新的平衡,不过这个平衡是动态的,叫动态平衡。因此,在电源内部,正电荷由 b 点(起点)移向 a 点(终点),是逆电场方向移动的,外力做正功,电场力作负功, $U_{ba} < 0$,且

$$U_{ba} = -U_{ab}$$

U_{ab} 仍然为正值。

外力将单位正电荷由负极 b 移向正极 a 所作的功定义为电源的电动势(electromotive force, 简称为 e.m.f.), 用字母 E 代表, 电动势的方向由负极指向正极。也可用箭头在电路图上标明。如果电流流过电源内部没有能量损耗, 这样的电源叫理想电源 (ideal source)。理想电源的端电压数值上等于电动势。

在国际单位制中,电压和电动势的单位都是伏特(volt),简称伏,国际符号为 V, 因

$$[U] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{\text{J(焦)}}{\text{C(库)}} = \text{V(伏)}$$

即电场将 1 C 正电荷由 a 点移动到 b 点所作的功为 1 J 时,则电压 U_{ab} 为 1 V。

高电压用千伏(kV)作单位,微小电压用毫伏(mV)或微伏(μ V)作单位。

用电池或直流发电机作电源的电路中, 电动势和电压都是恒定的, 用大写字母 E 和 U 表示; 其他形式的电源, 电动势和电压可以是时间的函数, 变动的电动势和电压则用小写字母 e 和 u 表示。

电压有时也叫电位差 (potential difference)。单位正电荷在电场中某一点具有的电位能定义为该点的电位。也就是单位正电荷从该点经过任意路径到无限远处时电场力所作的功。电位用符号 φ 表示, 单位也是伏特(V)。在图 1-2-3 中, 令 a 、 b 两点的电位分别为 φ_a 与 φ_b , 则

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-2-4)$$

当 $\varphi_a > \varphi_b$ 时, $U_{ab} > 0$, 即电场力做功是由于电场能量减少, 将电能转变为其他能量。在电源内部则是外力做功, 使 a 点电位高于 b 点电位, 将其他能量转变为电能。

在电路中往往规定其中任意一点 o 作参考点, 令参考点的电位为零。则任意点 a 与参考点 o 之间的电压 U_{ao} 便等于 a 点的电位 φ_a 。但要注意, 在一个系统中, 只能选择一个参考点。

电位也可以是时间函数, 但符号不再区别, 必要时用 $\varphi(t)$ 表示随时间变动的电位。

(三) 电功率

如前所述, 在二端电阻元件上, 正电荷在电场力作用下作有规则运动, 形成电流。在直流电路中, 根据电压的定义, 电场所作的功是 $A_{ab} = qU_{ab}$, 单位时间内电场所做的功称为功率

$$P = qU/t = UI \quad (1-2-5)$$

功率的单位是

$$\begin{aligned} [P] &= [U][I] = \text{V(伏)} \cdot \text{A(安)} \\ &= \frac{\text{J(焦)}}{\text{C(库)}} \cdot \frac{\text{C(库)}}{\text{s(秒)}} = \frac{\text{J(焦)}}{\text{s(秒)}} = \text{W(瓦)} \end{aligned}$$

即功率的单位是瓦特(watt), 简称瓦, 国际符号为 W, 当二端电阻