

高等学校教材

# 电工技术基础

DIAN GONG JI SHU JI CHU

黄锦安 钱建平 孙宪君 编



兵器工业出版社

## 内 容 简 介

本书是根据国家工科电工课程教学指导委员会制订的高等工业学校电工技术课程的教学基本要求编写的。全书执行了国家关于量、单位和电气图形符号的最新标准。

全书共十章。内容有电路的基本概念与基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、电路的频率特性、电路的暂态分析、磁路和变压器、异步电动机、继电-接触器控制、直流电动机。各章提供习题并附参考答案。

本书可作高等工业学校电工学“电工技术”教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工技术基础/黄锦安等编. —北京:兵器工业出版社,1998.12  
ISBN 7-80132-587-7

I. 电… II. 黄… III. 电工技术-基础理论 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 36400 号

出版发行:兵器工业出版社  
责任编辑:周宜今  
责任技编:魏丽华  
社 址:100089 北京市海淀区车道沟10号  
经 销:各地新华书店  
印 刷:国营531印刷厂  
版 次:1998年12月第1版第1次印刷  
印 数:1-6000

封面设计:底晓娟  
责任校对:姚培新  
责任印制:张 伟  
开 本:850×1168 1/32  
印 张:12.375  
字 数:317.49千字  
定 价:15.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

# 前 言

本书是根据国家工科电工课程教学指导委员会制定的高等工业学校电工技术课程教学的基本要求编写的,为非电类各专业的教学用书。

“电工技术基础”教材的编写,是在总结多年教学实践的基础上,参考已出版的同类优秀教材,根据教学改革的要求,精选了传统内容,适当地提高教材起点。电路部分增强了对暂态和频率特性的分析。把电机当作电路元件处理,着重讲解其基本原理和外部特性,并且加强了新技术内容的介绍。在内容编写上力求由浅入深,从具体到抽象,从物理概念到数学推导,尽可能符合人们的认识过程,使读者便于理解和掌握。编写时尽量做到教材内容的系统性、完整性、科学性和教学适用性的有机结合。

“电工技术基础”教材内容包括电路的基本概念与基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、电路的频率特性、电路的瞬态分析、磁路与变压器、异步电动机、继电-接触器控制、直流电动机等。

本教材是按照 60~80 学时要求的内容编写的,任课教师可根据各专业的特点和学时数,灵活取舍有关内容。

参加本书编写的有南京理工大学黄锦安(第一、二、六章)、钱建平(第三、四、五章)、孙宪君(第七、八、九、十章),樊鸿生、肖传汉、季孝荣、赵礼润等参加了前期编写工作。全书由黄锦安统稿。

本书由康泰兆、俞天锡教授仔细审阅并提出了很多宝贵意见。在编写过程中还得到校教材科、校教务处教学研究科、校自动化系领导及电工教研室同志的大力支持和协助,在此一并表示深切的谢意。

限于编者水平,对书中的不足与错误之处,希望使用本书的读者和教师给予批评指正。

编 者

1998 年 8 月

# 目 录

## 第一章 电路的基本概念与基本定律 ..... (1)

|                            |      |
|----------------------------|------|
| § 1-1 电路与电路模型 .....        | (1)  |
| § 1-2 电路的基本物理量及其参考方向 ..... | (4)  |
| § 1-3 电阻元件 .....           | (10) |
| § 1-4 独立电源——电压源与电流源 .....  | (12) |
| § 1-5 电路的三种状态 .....        | (16) |
| § 1-6 基尔霍夫定律 .....         | (19) |
| § 1-7 二端网络与等效变换 .....      | (24) |
| § 1-8 电位的计算 .....          | (34) |
| § 1-9 非独立电源——受控源 .....     | (38) |
| 习题一 .....                  | (41) |

## 第二章 电路的分析方法 ..... (52)

|                           |      |
|---------------------------|------|
| § 2-1 支路电流法 .....         | (52) |
| § 2-2 网孔电流法 .....         | (56) |
| § 2-3 节点电压法 .....         | (60) |
| § 2-4 叠加定理 .....          | (66) |
| § 2-5 等效电源定理 .....        | (70) |
| § 2-6 负载获得最大功率的条件 .....   | (78) |
| § 2-7 含受控源电路的分析计算方法 ..... | (81) |
| § 2-8 电路的对偶性 .....        | (86) |
| § 2-9 非线性电阻电路 .....       | (87) |
| 习题二 .....                 | (93) |

### 第三章 正弦交流电路 ..... (103)

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| § 3-1 正弦交流电的基本概念 .....                  | (104) |
| § 3-2 正弦量的相量表示法 .....                   | (110) |
| § 3-3 正弦交流电路中的电阻元件 .....                | (118) |
| § 3-4 正弦交流电路中的电感元件 .....                | (121) |
| § 3-5 正弦交流电路中的电容元件 .....                | (126) |
| § 3-6 $RLC$ 串联的正弦交流电路、复数阻抗与<br>功率 ..... | (131) |
| § 3-7 $RLC$ 并联的正弦交流电路与复数导纳 .....        | (139) |
| § 3-8 复数阻抗的串联与并联 .....                  | (143) |
| § 3-9 复杂正弦交流电路的分析与计算 .....              | (148) |
| § 3-10 功率因数的提高 .....                    | (153) |
| 习题三 .....                               | (155) |

### 第四章 三相交流电路 ..... (164)

|                     |       |
|---------------------|-------|
| § 4-1 三相交流电源 .....  | (164) |
| § 4-2 三相负载的联接 ..... | (168) |
| § 4-3 三相电路的功率 ..... | (176) |
| § 4-4 安全用电 .....    | (179) |
| 习题四 .....           | (185) |

### 第五章 电路的频率特性 ..... (187)

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| § 5-1 非正弦周期交流电的概念 .....          | (187) |
| § 5-2 $RC$ 串联电路的频率特性 .....       | (196) |
| § 5-3 $RC$ 串并联电路的频率特性 .....      | (200) |
| § 5-4 $RLC$ 串联电路的频率特性与串联谐振 ..... | (202) |
| § 5-5 $LC$ 并联电路的频率特性 .....       | (209) |
| 习题五 .....                        | (213) |

## 第六章 电路的暂态分析 ..... (217)

§ 6-1 换路定则与电压和电流初始值的确定 ..... (218)

§ 6-2  $RC$  电路的放电过程 ..... (222)

§ 6-3  $RC$  电路的充电过程 ..... (229)

§ 6-4 一阶直流、线性电路瞬变过程的一般求解  
方法——三要素法 ..... (236)

§ 6-5 微分电路与积分电路 ..... (239)

§ 6-6  $RL$  电路的瞬变过程 ..... (244)

§ 6-7  $RLC$  串联电路的放电过程 ..... (251)

习题六 ..... (257)

## 第七章 磁路与变压器 ..... (265)

§ 7-1 磁路基本知识 ..... (265)

§ 7-2 磁路基本定律 ..... (269)

§ 7-3 交流铁心线圈电路 ..... (279)

§ 7-4 变压器 ..... (277)

§ 7-5 电磁铁 ..... (294)

习题七 ..... (296)

## 第八章 异步电动机 ..... (302)

§ 8-1 三相异步电动机的结构 ..... (302)

§ 8-2 三相异步电动机的转动原理 ..... (304)

§ 8-3 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性 ..... (311)

§ 8-4 三相笼型异步电动机的起动 ..... (318)

§ 8-5 三相异步电动机的铭牌数据 ..... (322)

§ 8-6 三相异步电动机的选择 ..... (325)

§ 8-7 单相异步电动机 ..... (328)

习题八 ..... (331)

## **第九章 继电—接触器控制..... (334)**

§ 9-1 几种常用低压电器 ..... (334)

§ 9-2 继电—接触器控制线路的绘制与阅读 ..... (344)

§ 9-3 三相笼型异步电动机直接起动控制线路 ..... (347)

§ 9-4 三相笼型异步电动机的正反转控制 ..... (350)

§ 9-5 行程控制 ..... (352)

§ 9-6 时间控制 ..... (354)

§ 9-7 联锁环节 ..... (357)

**习题九..... (359)**

## **第十章 直流电动机..... (361)**

§ 10-1 直流电动机的结构 ..... (361)

§ 10-2 直流电动机的工作原理 ..... (363)

§ 10-3 直流电动机的励磁方式 ..... (365)

§ 10-4 并励电动机的机械特性 ..... (367)

§ 10-5 并励电动机的起动和反转 ..... (370)

§ 10-6 并(他)励电动机的调速 ..... (372)

**习题十..... (378)**

**习题参考答案..... (380)**



# 第一章 电路的基本概念与基本定律

本章主要介绍电路的基本概念与基本定律。它们是在学过大学物理和高等数学的基础上加以引申扩展的,如电路模型、等效以及参考方向等概念,将贯穿在整个电路分析计算的过程中。

电路的基本定律是电路分析计算的基础,必须理解深透、熟练掌握。

此外,本章还对电阻元件、电源等加以阐述,以使我们对这些元件的性质有更进一步的理解。电路的状态、电位的计算等电工技术中常遇到的一些问题,我们也加以说明。

## § 1-1 电路与电路模型

电路是电流的通路。它是根据某些特定的需要,由某些电工设备或电器元件按一定的方式组合起来的。

实际电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的。电路的作用大致可分为:

实现能量的传输与转换。最简单的电路就是白炽灯照明电路,它是把电池的能量,经过导线的传输,送到白炽灯(统称负载),使之完成能量的转换。如图 1-1 所示。

图 1-2 所示是一个较为复杂的电路(一个电力系统)。虽然它具有较多的电器设备,电路结构也比较复杂,但其基本作用仍然是进行能量的传输与转换。在此图中,发电机部分称为电源,电动机、电灯、电炉……等称为负载,其余部

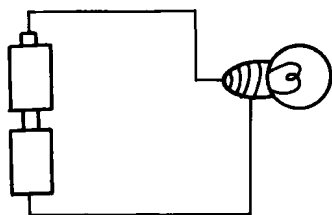


图 1-1 简单的实际照明电路图

分如变压器、输电线、保护设备……等是联接电源与负载部分的，称为中间环节。

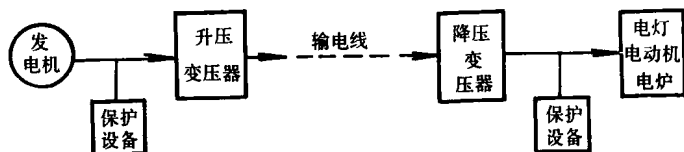


图 1-2 电力系统示意图

进行信号的传递与处理。在电子技术和非电量的测量中，常会遇到一些用于传递和处理信息（例如语言、音乐、图像、压力、温度……等）的电路。扩音机的电路就是这样的一种，其电路示意图如图 1-3 所示。它首先由话筒把接收的语言和音乐（通常称为信息）转换为相应的电流和电压，就是电信号，而后通过电路传递给扬声器，再把电信号转换为语言或音乐。话筒接收的信号往往很弱，因此中间还要用放大器将其放大。信号的这种转换、传递和放大称之为信号的传递和处理。

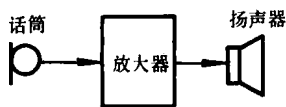


图 1-3 扩音机电路示意图

在图 1-3 中，话筒将接收的语言或音乐的声波转换为电信号输出，这种设备我们称之为信号源。扬声器是接收和转换信号的装置，也就是负载。

进行信息的存贮。例如计算机的存贮器电路，可以存放数据、程序等。

由上面的说明可以看出电路的组成如下：

电源 是产生电能和电信号的装置，如各种发电机、稳压电源、信号源等。

**负载** 是取用电能并将其转换为其它形式能量的装置,如电灯、电动机、电炉、扬声器等。

**中间环节** 是传输、控制电能或信号的部分,如联接导线、控制电器、保护电器、放大器等。

电工设备和器件的种类很多,即便是很简单的实际器件,在工作时所发生的物理现象也是很复杂的。例如一个实际的线绕电阻器有电流通过时,它除了对电流呈现阻力之外,还在导线周围产生磁场,因而兼有电感的性质;在线匝之间会存在电场,因而又兼有电容的性质。这些现象在高频电路中绝不能忽视。又如联接导线总有一点电阻,甚至还有电感和电容。所以直接对实际器件和设备组成的电路进行分析和研究,往往是困难的,有时还是不可能的。为了便于对电路进行分析计算,常常将实际器件加以理想化,即忽略它的次要性质,用一个足以表征其主要物理性质的“模型”(或称理想元件)来表示。电路模型具有以下特点:首先每一种电路模型所反映的物理性质可以用数学表达式精确地描述;其次任何一个实际器件中所发生的物理现象都可用各种电路模型的适当组合来表示。

理想电路元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件、独立电源与受控源等。

电阻元件是一种只表示消耗电能并将其转换为热能或其它形式能量的元件,用  $R$  表示,图形符号如图 1-4(a)所示。

电感元件是一种表示储存磁场能量的元件,用  $L$  表示,图形符号如图 1-4(b)所示。

电容元件是一种表示储存电场能量的元件,用  $C$  表示,图形符号如图 1-4(c)所示。

理想电压源是一种表示电压恒定、其内阻为零的独立电源元件,图形符号如图 1-4(d)所示。

理想电流源是一种表示电流恒定、其内电导为零(即内电阻为无限大)的独立电源元件,图形符号如图 1-4(e)所示。

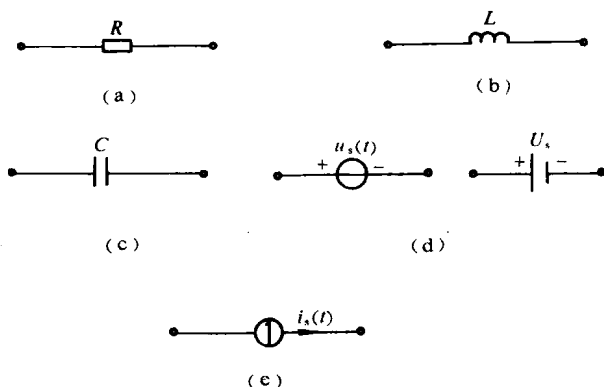


图 1-4 理想电路元件

引入了电路模型,那么图 1-1 所示的实际电路就可以用相应的电路模型来表示,如图 1-5 所示。

应当指出的是,图 1-5 中联接导线的电阻是忽略的,看作是理想导体。今后我们讨论的电路都是电路模型。

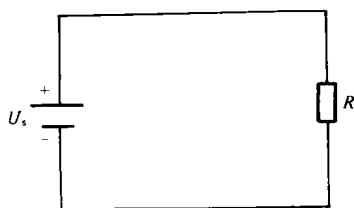


图 1-5 图 1-1 的电路模型

当对一个电路进行分析时,就是在已知电路结构、元件参数和激励形式的条件下,去确定电路的响

应,这将涉及到物理量电流、电压、电动势以及功率和能量等概念。

## § 1-2 电路的基本物理量及其参考方向

电路的基本物理量之一是电流强度,简称为电流,用符号  $i$  表

示。电流强度在数值上等于单位时间  $dt$  内通过某导体横截面的电荷量  $dq$ , 即

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

上式表示电流是随时间而变化的, 是电流的瞬时值表达式。

当电流不随时间变化时称为直流电流, 用  $I$  表示。此时

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

式中  $q$  的单位是库(C);

$t$  的单位是秒(s);

$I$  与  $i$  的单位是安培, 简称为安(A)。

电流的辅助量纲有千安(kA)、毫安(mA)和微安( $\mu$ A), 它们的关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

在物理学中规定: 正电荷的运动方向为电流的方向(实际方向)。但在复杂的直流电路分析中, 有时对某一段电路中电流的实际方向很难判断。而在交流电路中, 电流的实际方向又是不断变化的。因此很难在电路中标出电流的实际方向。由于这些原因, 引入了“电流的参考方向”这个重要概念。

在一段电路中, 我们可以在联接导线上任意选定一个箭头方向作为电流的参考方向。当然所选定的参考方向, 并不一定就是电流的实际方向。把电流看成是一个代数量, 当电流为正值( $i > 0$ ), 则表示电流的实际方向与所选定的电流的参考方向相同; 当电流为负值( $i < 0$ ), 则表示电流的实际方向与所选定的电流的参考方向相反。以上所述可参看图 1-6(a)、(b)。

因此电路中的电流, 在选定的参考方向下, 经过电路的计算所得电流的正负值就反映出电流的实际方向。显然, 在未选定电流的

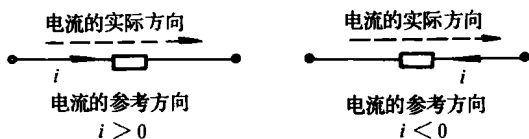


图 1-6 说明电流参考方向的图

参考方向的情况下,电流的正负值是没有意义的。

电路的另一个基本物理量就是电压。由物理学中可知,电荷在电场力的作用下就产生电流。电荷在移动过程中发生能量的转换,使电荷失去能量。例如图 1-7 所示电路接通时就有电流  $i$  流动。电场力将单位正电荷由电路的端点 A 经过电阻  $R$  移动到另一端点 B 所做的功,定义为该两点之间的电压  $u_{AB}$ 。

$$u_{AB} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中  $dw$  为电荷  $dq$  移动过程中所做的功,单位为焦耳(J);电压的单位为伏特,简称为伏(V)。

电压的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu V$ ),它们的关系是

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 10^3\text{V} \\ 1\text{mV} &= 10^{-3}\text{V} \\ 1\mu\text{V} &= 10^{-6}\text{V} \end{aligned}$$

由上述基本定义可知:正电荷在 A 点所具有的能量高,在 B 点所具有的能量低。因此我们说 A 点的电位高表示为正极,B 点的电位低表示为负极。将 A、B 两点之间的电压称为 A、B 两点间的电位差。即

$$u_{AB} = u_A - u_B \quad (1-4)$$

式中  $u_A$  为 A 点的电位, $u_B$  为 B 点的电位。

规定从高电位端指向低电位端的方向为电压的实际方向,即

为电位降低的方向。

在图 1-7 中,如果单位正电荷由 B 点经过电源内部移动到 A 点时,正电荷获得能量。此时是由其它形式的能量转换为电能,则必有局外力(电源力)对正电荷做功,使它从低电位移动到高电位。我们将这种局外力对正电荷做的功称为电源电动势。电源电动势  $e$  在数值上等于局外力(电源力)把单位正电荷由电源的低电位端 B,经过电源内部移动到高电位端 A 所做的功。电动势的单位和电压一样用伏(V)表示。

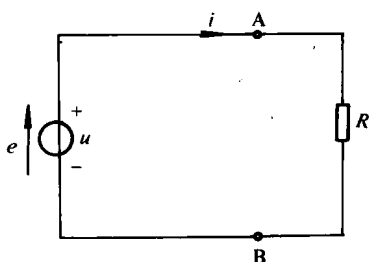


图 1-7 电压与电动势的参考方向

规定在电源内部由低电位端指向高电位端的方向为电动势的实际方向,即为电位升高的方向。

如同需要为电流规定参考方向一样,我们也需要为电压与电动势规定参考方向(也称为参考极性)。

电压与电动势的参考方向,一般可任意选定。在电路图中通常有两种标定方法:一种是用“+”、“-”极性表示,称为参考极性,如图 1-8(a)所示;另一种是用带箭头的短线表示,称为参考方向,如图 1-8(b)所示。当然也可以把电压用“+”、“-”极性,电动势用带箭头的短线表示,如图 1-8(c)所示。在书写时也可以用双下标表示,如  $u_{AB}$  则表示电压的参考方向为由 A 点指向 B 点。用电压、电动势代数值的正负结合参考方向可表示其实际

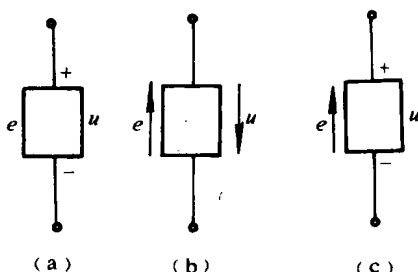


图 1-8 电压、电动势参考方向的表示法

方向。当电压或电动势为正值时,则实际方向与参考方向一致;当电压或电动势为负值时,则实际方向与参考方向相反。

在电路的分析与计算中,电流、电压与电动势的参考方向可以任意标定,但一经标定,电路方程的列写就必须在标定的参考方向下进行,不应改变。

对一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地任意选定。若选定的电流参考方向从标以电压“+”极性的一端流入,而从标以电压“-”

极性的一端流出,则电流的参考方向与电压的参考方向选得一致。

这种情况称为关联参考方向,如图

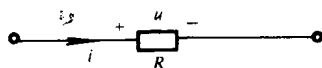


图 1-9 电压与电流的关联参考方向

1-9 所示。采用关联参考方向,在

未加说明的情况下,只要选定一段电路的电压或者电流任何一个物理量的参考方向后,另一个物理量的参考方向也就随之而定了。

由前所述,正电荷从电路中的 A 点经元件移到 B 点时,将失去能量或得到能量。若 A 点为元件电压的“+”极,B 点为元件电压的“-”极,则正电荷释放能量,即此元件吸收能量;若 A 点为元件电压的“-”极,B 点为元件电压的“+”极,则正电荷获得能量,即此元件向外释放能量。因此元件吸收的能量可以根据电压的定义,由式(1-3)得

$$dw = u dq$$

根据电流的定义,由式(1-1)得

$$dq = i dt$$

于是在电压、电流的关联参考方向条件下,如图 1-9 所示,该元件在  $dt$  时间内吸收的能量为

$$dw = u i dt$$

式中  $dw$  的单位为焦耳,简称为焦(J)。

该元件吸收能量的速率,即吸收的功率为



$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-5)$$

功率的单位为瓦特,简称瓦(W)。辅助单位有千瓦(kW)和毫瓦(mW),它们的关系是

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}$$

$$1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$$

元件采用关联参考方向后,我们可以用式(1-5)计算元件的功率。由于电压、电流均为代数量,所以计算得到的功率也将是一个代数量,若  $p > 0$ ,则表示该元件吸收功率;若  $p < 0$ ,则表示该元件产生功率。

若采用非关联参考方向,如图 1-10 所示。由于此时电流为关联参考方向时电流的负值,因此在应用功率计算公式时,前面应加一个负号,即

$$p = -ui \quad (1-6)$$

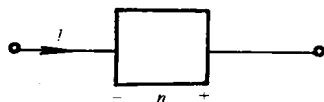


图 1-10 电压、电流的非关联参考方向

若用式(1-6)计算所得的功率  $p > 0$  时,则表示该元件吸收功率;若计算所得的功率  $p < 0$  时,则表示该元件产生功率。

例 1-1 计算图 1-11 所示各元件的功率,并判别该元件是吸收功率还是产生功率。

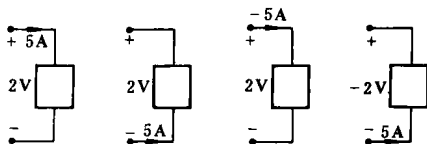


图 1-11 例 1-1 的电路