

高等学校教材

电工技术

(电工学 I)(第二版)

王居荣 等主编

哈尔滨工业大学出版社

高等学校教材

电工技术

[电工学 I] [第二版]

王居荣 王哈力 王晋华 主编

哈尔滨工业大学出版社

电工技术

(非电专业用)

内容简介

本书是根据国家教育委员会 1995 年 5 月颁布的“高等工业学校电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”修订的。全书共八章,包括:绪论、电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、电路的暂态分析、异步电动机、直流电机和继电器接触器控制系统。

本书精选内容,突出重点,打好基础,利于教学。

本书为高等学校非电类专业电工技术课程(50~70 学时)教材,可供工程技术人员参考。

电 工 技 术

Diangong Jishu

[电工学 I]

王居荣等 主编

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

(哈尔滨市南岗区复兴街18号150001)

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.75 字数 272 000

1998 年 9 月第 2 版 1998 年 9 月第 2 次印刷

印数 8 001~13 000

ISBN 7-5603-1131-8/TM·13 定价 14.50 元

再 版 前 言

本书是根据国家教育委员会 1995 年 5 月颁布的“高等工业学校电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”修订的,可作为高等学校非电类专业电工技术课程(50~70 学时)的教材。

本着“精选内容,打好基础,加强实验,培养能力”的精神,我们把教材的重点放在基本理论、基本方法和基本概念以及电工元器件的外部特性和使用知识等方面,适当提高了起点,避免与物理学内容重复,加强了教材的可读性和可用性。本书的图形符号和文字代号全部采用新的国家标准。

本书共八章,第一章至第五章为电路理论,第六章至第八章为电机与控制。绪论由王居荣编写;第一、二章由王晋华、曹玉泉编写;第三、四章由刘丽娟、宋黎明编写;第五章由范明清编写;第六、八章由王哈力编写;第七章由宋黎明编写;习题答案由柏晓鹤验算。本书由王居荣、王哈力、王晋华担任主编,宋黎明、刘丽娟、范明清担任副主编,由王瑛、王矛棣担任主审。

由于编者水平有限,书中不妥之处仍恐难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998 年 5 月修订

绪 论

一、电工学的研究对象及其与生产发展的关系

电能以电磁场为载体存在于客观世界中。电工学是研究电磁现象及其在技术领域中的应用的技术基础课程。以电工学中的理论和方法为基础而形成的工程技术中包含电工技术和电子技术两大部分。电工技术（例如发输、变换、配用电能的技术和电力设备制造技术等）是研究能量与电磁场运动的科学技术，而电子技术（例如调节、保护、控制电能的自动化技术和相应电子装置的制造技术等）是研究信息与电磁场运动的科学技术。

当代高新技术都与电能密切相关，且依赖于电能。应该明确认识到：是电能保证着高新技术的发展，而不是热能、光能或动能。电能是计算机、字符处理机和工业机器人的能源；电能为先进的工农业生产过程和大范围的金融流通提供了保证；电能使当代先进的通讯技术（电视、广播、通信、卫星传播以及空间接送信息等）成为现实；电能使现代化运输手段（外层空间传送、航空运输、电气化火车以及电气汽车

等)得以实现。

电工学在国家科技体系中具有特殊的重要地位。它既是国民经济的一些基本工业(能源、电力、电工制造等)所依靠的技术科学,又是一些基本工业(交通、铁路、冶金、化工、机械等)必不可少的支持技术,是一些高新技术的重要科技组成部分。在与生物、环保、自动化、光学、半导体等技术的交叉发展中,它又是形成尖端技术和新技术分支的促进因素。在一些综合性高科技成果(如导弹、卫星、核弹、空间站、航天飞机等)中也必须有电工、电子的新技术和新产品。总之,在国防力量和工农业的发展以及人民生活水平的提高过程中,电工科技的进步具有广泛的影响和巨大的作用。

二、电工学发展概况

人类从古代就注意到电和磁的现象。经过不断的探索和创造,直到19世纪末麦克斯韦才首次以严格的数学形式对电磁场及其运动作了科学的概括,形成了完整的宏观电磁场理论。至此才正式建立了电工学完整的科学基础。在此期间,电工理论的发展也促成了大量实用性的发明,如电弧灯、电热灯、电报、电话、电影、电机等。此后发电机、电动机、输电线、广播、电视等相继出现,为工业革命提供了新的动力,促进了工业化和生产力的迅速发展,促成人类技术发展过程中的第二次技术革命,具有重要的历史意义。所以电工学是一门历史悠久,对人类文明进步和技术发展影响重大的成熟学科,又是受生产发展和高新技术影响而处于向纵深发展中的学科。它既是许多新兴学科发生和发展的基础,又是不断从新兴学科中吸取成果,丰富和更新自己学科内涵的一门具

有旺盛生命力的技术科学。

近 20 年来，科学技术发展中的“边缘生长”和“交叉渗透”等大趋势和高技术的发展，使电工学又呈现出兴旺的态势。新兴的半导体技术应用于电力技术后，与集成电子技术和控制技术等交叉形成了电力电子技术，使电工、电子技术跨进了新时代。此外，电工学与流体力学、低温物理、量子力学、电子学、材料科学、数学等多学科交叉形成的超导电工技术、磁流体发电技术、高功率脉冲技术、等离子体技术、电接触和电加工技术等电工新技术，既促进了电工理论的深化和发展，又拓宽了电工、电子技术中新的应用范围和服务领域。

三、我国电工、电子技术发展概况以及亟待解决的问题

解放前，我国电工技术的基础薄弱而落后。建国后，有了多方面的巨大发展。

目前，我国一次能源总产量达 980Mt（兆吨）标准煤（1990 年），居世界第 3 位，比 1949 年增长了 40 倍。但电能比重仍较落后，只占国民经济总能源消耗的 25% 左右。

我国电力工业从 1949 年的发电量 4.3 TW·h（太瓦小时，即兆兆瓦小时，世界排序第 25 位）和装机容量 1850MW（世界排序第 21 位）分别增加到 1995 年的 1 006.9TW·h 和 217.224GW（吉瓦，即千兆瓦，全国发电量居世界第二位，发电装机容量居世界第三位），各增大到 234 倍和 117 倍。发电量平均年增长率在 13% 以上，居于世界先进行列。

电工制造业以技术复杂的汽轮发电机组为例，我国 1956 年才试制成功 6000kW 机组，到 1989 年已制成并投产

600MW 机组，即 33 年期间汽轮发电机单机容量的制造能力扩大到 100 倍，居于世界先进行列。

在电气化方面，工业用电量占全部电能生产的 78.7 % (1990 年)，近 10 年来，每年新增发电量的 64.6 % 用于工业用电，其中轻工业用电的年增长率已达 14.6 %。农业用电增长也很快，自解放以来，平均每年以 24% 的高速增长。市政和居民用电量到 1990 年已达电能总生产量的 12.8 %，近 10 年中就增长了 3 倍多。除了用电量和用电范围扩大外，电气化的技术也在不断提高，例如照明技术、电力传动的控制技术、农电设备的制造和运行技术以及家用电器制造技术等方面都有较大的提高和进步。

在电力电子和电工新技术领域中，我国从 1962 年试制出第一只晶闸管起，到目前已能批量生产电流达 1650A、电压为 4500V 的晶闸管，并能研制生产和应用快速、全控器件或设备。在电工新技术的范围内，我国已从空白状态发展并形成多个相互配合的研究基地或重点实验室，并相继取得一些世人瞩目的研究成果。

综上所述，我国电工、电子技术无论在传统的电力输送、电工制造或高电压技术方面，还是在电工新技术和高技术领域中都取得可喜的进展和成绩。这说明我国的电工、电子技术已发展成为国民经济发展中可靠的支柱。但是国民经济日益发展所提出的新问题和国际电工、电子技术的快速发展所形成的国内外差距，又要求我国电工界一方面应认真规划我国电工学科的新发展，另一方面必须进一步引导、支持、促进关键项目的研究，以便带动整个学科，以及相关交叉的学科的进一步发展。因此对电工、电子技术相应地提出

了急需解决的一些问题和要求：

扩大能源生产，满足工业和电力增长的要求。例如：1988年工业增长24%，电力增长9.6%，而能源只增长4.8%；

迅速扭转缺电局面，努力降低煤耗、厂用电、电网损失等，开展节能、节材、节资技术的研究和推广；

应用新理论、新方法、新材料、新工艺加强电工、电子制造业的发展，尤其是在机电一体化系统等新崛起的领域中的研究；

电工新技术和新产品方面与国外差距较大，应加强资助，鼓励协作，创造必要的条件，使其能和工业应用进一步结合起来。

综上所述，我国电工、电子科技已取得的进展是巨大的，但和国外先进水平相比较，仍存在着不同程度的差距。已取得的成就是我国电工、电子科技进一步发展的物质基础，而所存在的差距则是进一步发展的参考目标。

四、课程的任务和学习方法

电工、电子技术的研究范围十分广泛，涉及的学科内容很多。电工学课程不可能将所有的电工、电子技术的基本理论和实际应用都包括进来，它只能为非电类工程专业的学生提供一定的电工与电子技术理论知识和实际工作技能。为学习后续课程及将来从事专业工程技术工作提供必要的基础。

学习课程内容、演算习题及进行实验是本课程的三个主要教学环节，都要给予充分的重视。

1. 掌握基本理论，理解电路的工作原理，学会电路的分析方法，了解基本电路的实际应用。电工理论体系完整，各

部分内容有机地联系在一起。读者要深入钻研，积极思考，努力培养自学能力。

2. 演算习题是学会分析计算方法的必要途径，是深入理解基本理论、培养分析和解决实际问题能力的关键所在。在解题前，应首先复习所学内容，仔细分析相关例题。要独立解题，并验证计算结果。切忌乱套公式的做法。

3. 电工、电子技术是实践性极强的课程，实验是本课程的一个重要环节。通过实验验证能巩固所学理论，训练科学实验技能，发现和创造新的实用电路，培养严谨求实的科学作风。实验前要充分预习和准备；实验时要亲自动手，严肃认真地完成实验的每一步骤；实验后要及时编写出完整的实验报告。

第一章 电路的基本概念 和基本定律

电路的应用十分广泛。从最简单的电路到结构非常复杂的电路之间，有着许多最基本的共性，遵循着相同的规律。本章在普通物理学和高等数学的基础上，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物理量及其参考方向的意义；着重讨论约束电路中电压、电流规律的克希荷夫定律。克希荷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，将贯穿本课程的始终。

如果电路中电压和电流不随时间而变化，则该电路称为直流电路；反之，称为交流电路。直流电路中所介绍的基本概念、基本定律和基本分析方法，只要稍加扩展，就可以用来分析交流电路，所以本章内容是分析和计算电路的理论基础。

1-1 电路的组成

一、电路和电路模型

电流的通路称为电路。它是由许多电气元件和设备组成的总体。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。电路的另一个作用是实现对电信号的传递、变换和处理，如放大、滤波、存储或记忆等。

实际的电气设备和元器件在工作过程中，所涉及的物理过程相当复杂。而电路所要研究的只是其中的电磁过程，而且是由电路里各部分的电压、电流、磁通等所表征的电磁过程。因此，为了便于用数学的方法分析和设计电路，常常把实际电路及其部件近似化、理想化。即在一定的条件下，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要特性的理想化模型来表示。理想化模型是由一些理想化元件组成的。所谓理想化元件本身也是一些简单模型。例如，一个白炽灯，它除了主要将电能转换成光能和热能，表现出电阻的性质，即消耗能量外，而且当通有电流时，还会产生微小的磁场，即兼有电感的性质。当忽略这个微小电感量时，就得到白炽灯的理想化模型——电阻元件。一个实际电路的电路模型在一定条件下，就可以通过电路元件以一定的联接方式来构成。

最基本的理想化电路元件有：只消耗电能，并将电能转换为其它形式能量的电阻元件；只表示磁场效应，具有存储或释放磁场能量性质的电感元件；只表示电场效应，具有存

储或释放电场能量性质的电容元件；能够将其它形式的能量（如化学能、机械能、核能或太阳能等）转换为电能的电源元件。我们所研究的电路，就是从实际电路中抽象出来的，由理想化电路元件所组成的电路模型（简称电路）。

二、电路的组成

电路由电源、中间环节和负载组成。最简单的电路如图 1-1 所示的手电筒电路。

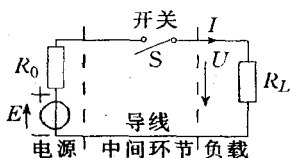


图 1-1 手电筒电路模型

电源：电源是电路中提供电能或电信号的器件。例如干电池、蓄电池、发电机等。电源的电压或电流常称为激励函数或激励。

负载：负载是用电设备，是吸收电能或输入电信号的器件，如图 1-1 中的灯泡。负载上的电流或电压称为响应。

中间环节：中间环节起传递、分配、处理和控制在电能或电信号的作用。最简单的中间环节就是开关和导线，如图 1-1 所示。中间环节一般还有保护和测量设备。对于一个实际电路来说，中间环节也可能是相当复杂的，它可能是由各种元器件或设备组成的复杂电路。

本课程研究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、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，确定相应于激励的响应。

1-2 电路的基本物理量及其参考方向

一、电 流

电荷有规则的定向运动，称为电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。电流的大小等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。设 dt 时间内通过电路导体横截面的电荷为 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；用大写英文字母 I 表示不随时间变化的电流，称为恒定电流或直流电流。所以式 (1-1) 可改写为

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

式中 q 是在时间 t 内通过电路横截面的电荷量。

电流的单位是安培，简称安，用大写字母 A 表示。对于较大、较小的电流，可用千安 (kA)、毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位，它们的关系是

$$1kA = 10^3A \quad 1A = 10^3mA = 10^6\mu A$$

二、电压和电动势

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。通常将电路图作

为一个完整的体系,可以指定电路中任意一点(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,电路中各点电位是代数量。电位比参考点高者,电位值为正,低者为负。电路中各点电位都有确定的数值,称为电位的单值性。电路中 A 点的电位用 u_A 或 U_A 表示。

电路中两点电位之差称为电位差,亦称电压。在图 1-2 中, A 与 B 间的电压等于两点电位之差,记作

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad (1-3)$$

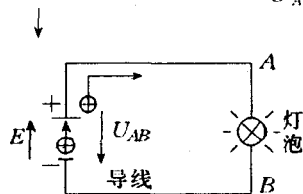


图1-2 电动势的作用

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。习惯上规定双下标的顺序为电压的方向,所以电压方向是指电位降落的方向,故有时也称电压为电位降。通常用极性(用+、-号表示相对极性的

的正、负)或有箭头的线段或相应的文字下标来表示电压。

根据电压的定义,可以知道电压或电位差与电路的参考点选择无关。此外,电压或电位差还与计算路径无关。

电源两端具有电位差或电压。电源的电位差是由电源力(如化学力、机械力)把正电荷从电源的低电位端 B (负极),经过电源内部,移到电源的高电位端 A (正极)引起的。电源力在这个过程中所做的功与正电荷的比值,定义为电源的电动势,用 E 表示。电源电动势的方向规定从负极指向正极,所以有时也称为电位升。图 1-2 标注有电源电动势及其端电压的方向和极性。图中 E 与 U_{AB} 的箭头方向相反,这是由于其含义

不同(电位升与电位降),实际上都是设正极 A 点的电位比负极 B 点的电位高,故有

$$E = U \quad (1-4)$$

按照电位、电压和电动势的定义,其量纲均为〔焦耳/库伦〕(〔J/C〕),所以其单位都是伏特,简称伏,用 V 表示。

三、参考方向

物理学中规定的电流、电压的方向,称为实际方向。电流的方向是指正电荷运动的方向,电路中两点电压的方向是从高电位指向低电位的方向。

在分析电路的时候,电路中的电流、电压正是求解的对象,电路中各点电位的高低预先很难判定,电流的实际方向也难以确定。特别是在交流电路中,电流、电压的实际方向随时间不断地反复改变,所以就更难以确定其实际方向了。为了便于分析电路,才引入“参考方向”的概念。

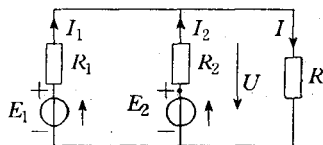


图1-3 U 、 I 、 E 的参考方向图

电流、电压的参考方向是人为任意假设的方向。如图 1-3 中所标的电流、电压方向都是参考方向。在 $E_1 \neq E_2$ 的情况下,不作具体计算,就不能判定 I_1 、 I_2 的电流都是从电源

正极流出的。但是分析计算电路又必须以知道电流的方向为先决条件。为了解决这一矛盾,就采取事先假设电流、电压参考方向的办法,图 1-3 中 I_1 、 I_2 、 I 及电压 U 的方向都是假设的参考方向。

按照参考方向分析、计算电路,得出的电流、电压值可

能为正，也可能为负。正值表示假设的电流、电压的参考方向与实际方向一致，负值则表示二者方向相反。

一般来说，参考方向的假设完全可以是任意的。但应注意，一个具体电路一旦假设了参考方向之后，在电路的整个求解过程中就不允许再作改动。

参考方向可用箭头表示的标注方向，还可以用“+”、“-”号标示，也可以用双下标的方法来表示。有时甚至二种标示方法同时使用。

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时，则称它们为关联(一致)的参考方向。例如，图 1-3 中，电流 I 和电压 U 间采取了关联的参考方向，这时端电压就可以用欧姆定律表示为

$$U = RI$$

若采用非关联参考方向，即电流 I 与电压 U 的参考方向相反，则电阻 R 两端电压应表示为

$$U = -RI$$

其它物理量，如电动势、电位、磁通等，在进行电路分析计算时，也要选定参考方向。

四、功率的计算

在一段电路中，在选取关联的电流、电压参考方向的前提下，输入这段电路(或电路吸收、电路消耗)的功率等于电压和电流的乘积，以 P 表示为

$$P = UI \quad (1-5)$$

如果电压和电流都是交变量时，则写成

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