

高等学校教材

电 工 学

(第二版)

华南师范大学物理系 合编
郭木森 廖玄九 张绍南

高等教育出版社

内 容 提 要

本书以廖玄九、郭木森、屠广霖合编的1979年出版的《电工学》为基础,参照1980年出版的高等师范物理专业电工学教学大纲及1983年出版的中学教师进修高等师范本科物理专业电工学教学大纲进行修订改编而成。

全书共十二章,包括:绪论,网络的基本分析方法,网络的正弦稳态分析,三相正弦交流电路,简化网络分析的定理和定理,受控源电路的分析方法,网络拓扑和矩阵分析法简介,电工仪表,变压器,异步电动机,直流电机,同步发电机,配电与安全用电。此外,书末还有电工实验指导和两个附录。实验包括:日光灯电路,三相负载的连接,三相变压器绕组始末端和连接组的判别,异步电动机的使用,低压控制电器的使用,直流电机的使用,同步发电机的使用。

本书可作为高等师范院校物理专业的电工学教材,也可作为中学教师进修高等师范本科物理专业电工学课程的卫星电视教育教材。

责任编辑 郭玉凤

高等学校教材

电 工 学

(第 二 版)

华南师范大学物理系

郭木森 廖玄九 张绍南 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 17.25 插页 1 字数 410 000

1979年3月第1版 1987年10月第2版 1987年10月第1次印刷

印数 00 000—11 110

ISBN 7-04-000021-0/TM·2

书号 15010·0891 定价 3.55 元

前 言

《电工学》试用教材自1979年出版以来,得到各方面重视,许多学校用作教材。在本次修订过程中,兄弟院校的电工学老师提出许多宝贵的意见。对兄弟院校的关怀与支持,在此表示衷心感谢。

本书的修订,参照了高等师范院校物理专业电工学教学大纲及中学教师进修高等师范本科物理专业电工学教学大纲。电机部分的内容和大纲的要求大致相同,电路基础部分的内容稍多一些,以便于根据各校的需要进行选择。

鉴于不少学生在学习电磁学课程时,对电路变量参考方向(参考极性)在描述电路基本规律中所起的作用尚未十分明确,因此,第一章就以这个概念为基本线索,对电磁学已讲过的电路基本规律作总结性的复习。在此基础上,介绍了节点分析法和回路分析法。考虑到动态网络的电路方程是常微分方程,因此,在总结常微分方程解法的基础上,举了一些例子。这样处理既可为讲解网络的正弦稳态分析作了准备,又可以把和电磁学相重复的内容省略。

第二章保留了原书的主要内容,但在写法上作了修改。从内容编排的次序来看,前二章很相似,其目的是便于读者进行对比,以掌握这两章内容的共同点和特殊点。掌握共同点,有助于读者总结新学的知识;掌握特殊点,在处理实际电路问题时可少犯错误。

考虑到简化网络分析的定理和定理在网络时域分析和正弦稳态分析中都可以应用,因此,统筹兼顾这两方面的内容对读者是有益的。

在现代电路分析中,电子器件可用含有受控源的等效电路来表示,因此,受控源电路分析成为电路部分不可缺少的内容。为便于取舍,我们把它单独编成一章。

简单介绍网络拓扑和矩阵分析法及计算机在网络分析中的应用,既能开扩学生的眼界,又能巩固和扩大他们所掌握的 BASIC 语言基本知识。

变压器和异步电动机是常用的电器,较深入地介绍其运行特性和等效电路,这不仅对了解它们的工作原理和性能是必要的,而且能使学生掌握运用等效电路代替工程器件的方法。

异步电动机和变压器既有相同点,又有特殊点。成为我们认识事物的基础东西,则是特殊点,因此,较详细地叙述定子和转子主磁感应电动势、电压平衡方程和磁势平衡方程是必要的。这不仅为讲解异步电动机的机械特性打下较好的基础,而且对学习其他类型的电机起“举一反三”的作用。

使用本书时可结合各校具体情况进行取舍。若在电磁学中已讲过正弦交流电路,则第一、二章只需要进行简要复习,然后讲解 § 1-4、§ 1-5、§ 1-7、§ 2-7 和 § 2-8 等数节。学时不宽裕的,打星号“*”的章节可以删去,学时较紧时,打星号“*”的章节也可不讲或只选讲其中的一部分。

本次修订,第一章至第六章由郭木森同志负责执笔,第七章至第十二章由张绍南同志负责执笔,廖玄九同志审阅了初稿。

由于编者水平有限,缺点和错漏在所难免,恳切希望使用本书的教师及读者批评指正。

编 者

1986 年 1 月于广州

文字符号说明

一、物理量符号

A	关联矩阵	G_B	支路电导矩阵
A^T	关联矩阵的转置矩阵	G_E	元件电导矩阵
B	电纳, 磁感应强度	G_M	转移电导矩阵
B	电流放大系数矩阵	G_N	节点电导矩阵
B_G	容纳	g_m	转移电导
B_L	感纳	I	直流电流, 电流有效值
B_{av}	磁感应强度的平均值	i	电流相量
B_I	基本回路矩阵	i^*	电流相量的共轭复数
B_m	磁感应强度最大值	I_A	直流电机的电枢电流
C	电容	I_C	计算电流
C_m	电动机转矩常数	I_F	励磁电流
D	电压放大系数矩阵	I_L	负载电流
d	直径	I_N	额定电流
E	直流电动势, 正弦电动势有效值	I_O	中性线电流, 变压器空载电流
$\dot{E}$	电动势相量	I_B	直流电流源的电激流, 起 动电流
E_m	电动势最大值	I_{TR}	冲击电流
e	电动势(时变量)	I_A	同步发电机的电枢电流
e_B	支路电动势列向量	I_l	线电流有效值
e_L	自感电动势	I_m	正弦电流最大值
e_0	等效电压源电动势	i_{S0}	等效电流源的电激流相量
$\dot{F}$	磁势相量	I_φ	相电流有效值
F_m	磁势最大值	I_0	初始电流
f	频率	i	电流(时变量)
f	力(时变量)	i_B	支路电流列向量
G	电导	i_D	受控源输出电流列向量

I_N	等效电流源列向量	q	极板电荷, 每极每相指数
i_B	电激流	R	电阻
i_B	支路电激流列向量	R_A	电枢绕组电阻
i_{B0}	等效电流源的电激流	R_d	短路电阻
j	电流密度	R_M	转移电阻矩阵
k	绕组系数, 变压比, 变流比	R_i	电流源的内阻
k_s	异步电动机的电动势比值	R_j	绝缘电阻
L	自感系数	R_r	输入电阻
l	长度, 连支数, 独立回路数	R_u	电压源的内阻
M	互感系数, 电磁转矩	R_0	等效电压源或等效电流源的内阻
M_N	额定转矩	r_m	转移电阻
M_S	起动转矩	S	视在功率, 线圈面积, 每极下面的气隙面积
M_f	阻力转矩	S_C	计算负荷
M_{max}	最大转矩	s	转差率
m	转矩(时变量), 支路数	T	周期
N	匝数	t	时间, 树枝数
n	节点数, 每分钟转速	t_0	初始时刻
P	有功功率	U	直流电压, 正弦电压有效值
P_{Cu}	铜损	$\hat{U}$	电压相量
P_E	涡流损耗	U_N	额定电压
$P.F.$	功率因数	$\hat{U}_{O'O}$	中性点间的电压相量
P_F	铁损	U_d	短路电压(阻抗电压)
P_H	磁滞损耗	U_i	线电压有效值
P_N	额定功率	U_e	相电压有效值
P_i	输入功率	$\hat{U}_0$	同步发电机的空载电压
P_o	输出功率	u	电压(时变量)
p	瞬时功率, 磁极对数	u_B	支路电压列向量
p_B	支路电功率列向量	u_D	受控源输出电压列向量
p_E	元件电功率列向量	u_N	节点电压列向量
p_R	瞬时功率的有功分量		
p_X	瞬时功率的无功分量		
Q	无功功率, 热量		

v	线速度
X	电抗
X_0	容抗
X_L	感抗
X_{TR}	瞬态电抗
X_s	同步反应电抗
X_d	短路电抗
X_j	漏抗
Y	复导纳
Y_0	中性线导纳
y	导纳(复导纳的模)
y_m	转移导纳
Z	复阻抗
Z'	等效(折合)阻抗
Z_d	短路阻抗
Z_i	电流源的内阻抗
Z_r	输入阻抗
Z_u	电压源的内阻抗
Z_0	中性线阻抗
z	阻抗(复阻抗的模)
z_m	转移阻抗
α	初位相, 偏转角
β	电流放大倍数
β_N	相对额定误差
β_{max}	最大相对误差
η	效率
θ	初位相, 绕组始端和转轴的连线跟坐标轴所夹之角
λ	波长
μ	电压放大系数
ρ	电阻率
τ	极距

φ	初位相
ϕ	磁通(时变量)
ϕ_1	漏磁通
ϕ_0	空载变压器铁心中的磁通
Φ_m	正弦磁通最大值
Φ_0	每极磁通
ϕ_s	电枢磁通相量
ψ	磁链
ω	角频率

二、电工系统文字符号

A, a	始端
AN	按钮
B, b	始端
B	变压器
C, c	始端
C	接触器
CLJ	过流继电器
D	电动机
D_1, D_2, D_3	始端
D_4, D_5, D_6	末端
DK	闸刀开关
F	发电机
FC	反转接触器
FQA	反转起动按钮
HD	红灯
HKD	电压换相开关
J	继电器
K	开关
LD	绿灯
LH	电流互感器
LJ	电流继电器
QA	起动按钮

QC	起动接触器
RD	熔断器
RJ	热继电器
SJ	时间继电器
TA	停车按钮
WK	万能转换开关
XWK	限位开关
YA	运行按钮
YC	运行接触器
YJ	电压继电器
ZC	正转接触器
ZD	照明灯
ZJ	中间继电器
ZOB	自耦变压器
ZQA	正转起动按钮

ZSD 指示灯

三、其他符号

CCCS	电流控制电流源
CCVS	电流控制电压源
I	支路号
J	起始节点号
K	终止节点号
KCL	基尔霍夫电流定律
KVL	基尔霍夫电压定律
L	元件类别号
M	支路数
N	节点数
V	元件参数
VCCS	电压控制电流源
VCVS	电压控制电压源

目 录

结 论	1
第一章 网络的基本分析方法	3
§ 1-1 参考方向和参考极性 电流和电压的波形	3
§ 1-2 元件的特性方程	6
§ 1-3 基尔霍夫定律	20
§ 1-4 节点分析法	22
§ 1-5 回路分析法	25
§ 1-6 动态网络分析举例	31
§ 1-7 有互感的网络	37
§ 1-8 二端网络的功率	44
第二章 网络的正弦稳态分析	52
§ 2-1 引言	52
§ 2-2 正弦交流电的有效值	52
§ 2-3 正弦量的相量表示法 基尔霍夫定律的相量形式	54
§ 2-4 无源元件特性方程的相量形式	64
§ 2-5 复阻抗 有源元件的特性方程	77
§ 2-6 复导纳	83
§ 2-7 分析正弦交流电路的基本方法	93
§ 2-8 有互感的网络	100
§ 2-9 交流电路的功率和功率因数	102
§ 2-10 提高负载功率因数的意义和方法	114
第三章 三相正弦交流电路	124
§ 3-1 三相正弦交流电动势的产生	124
§ 3-2 三相电源绕组的连接法	129
§ 3-3 三相负载的连接法	135
§ 3-4 三相负载的功率	144
第四章 简化网络分析的定理和定理	154
§ 4-1 叠加原理	154

§ 4-2	电压源与电流源的等效互换	160
§ 4-3	戴维南定理 *诺顿定理	164
* § 4-4	星形与三角形网络的等效变换	172
* § 4-5	非正弦周期电流电路的稳态分析	178
第五章	受控源电路的分析方法	198
§ 5-1	受控源	198
§ 5-2	受控源电路的基本分析方法	204
* § 5-3	受控源电路的简化分析	208
**第六章	网络拓扑和矩阵分析法简介	224
** § 6-1	复合支路及其特性方程	224
** § 6-2	网络拓扑的基本概念	229
** § 6-3	基尔霍夫定律的矩阵形式 拓扑矩阵	232
** § 6-4	节点分析法	238
** § 6-5	直流电路的计算机分析程序	252
第七章	电工仪表	270
§ 7-1	概述	270
§ 7-2	磁电系电表与电磁系电表	274
§ 7-3	电动系电表	278
§ 7-4	感应系电表	282
* § 7-5	流比计	291
第八章	变压器	296
§ 8-1	变压器的用途和分类	296
§ 8-2	变压器的空载运行	298
§ 8-3	变压器的负载运行	306
§ 8-4	变压器的等效电路	314
* § 8-5	变压器的功率损耗和效率	316
§ 8-6	三相变压器	321
§ 8-7	其它变压器	331
第九章	异步电动机	339
§ 9-1	异步电动机的构造	339
§ 9-2	异步电动机的转动原理	342
§ 9-3	异步电动机的电路分析	351

§ 9-4 异步电动机的电磁转矩·····	368
§ 9-5 异步电动机的使用常识·····	374
§ 9-6 单相异步电动机·····	380
§ 9-7 电动机的控制电路·····	388
第十章 直流电机 ·····	411
§ 10-1 直流电机的基本原理与构造·····	411
§ 10-2 并励直流电动机·····	415
§ 10-3 并励直流发电机·····	421
第十一章 同步发电机 ·····	428
§ 11-1 同步发电机的构造和原理·····	428
§ 11-2 同步发电机的单机运行分析·····	432
** § 11-3 同步发电机的并网运行·····	445
第十二章 配电与安全用电 ·····	454
* § 12-1 配电线路·····	454
** § 12-2 配电屏·····	465
§ 12-3 安全用电·····	473
电工实验指导 ·····	478
实验一 日光灯电路·····	480
实验二 三相负载的连接·····	487
实验三 三相变压器绕组始末端和连接组的判别·····	490
实验四 异步电动机的使用·····	495
实验五 低压控制电器的使用·····	502
实验六 直流电机的使用·····	508
实验七 同步发电机的使用·····	514
附录一 单相小功率电源变压器的计算·····	516
附录二 三相异步电动机的定子绕组·····	524
各章部分习题答案 ·····	536

绪 论

我国在公元前已发现电和磁的现象。在古籍中曾有“慈石召铁”和“琥珀拾芥”的记载。在《韩非子》一书中曾提到“司南”，可见当时已知道应用磁石指示方向。以后由于航海事业的发展，在十一世纪就发明了指南针。在宋代沈括所著的《梦溪笔谈》中有“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也”的记载。这不仅说明当时有了指南针，而且已发现了磁偏角。

十六世纪，吉尔伯特对电和磁的现象进行了系统的研究，受到同时代人的重视。到了十八世纪末和十九世纪初期，电磁方面的研究工作发展很快。1785年，库仑测定了电荷之间的相互作用力，从而赋给电荷以定量的意义。1800年，伏特发明了伏特电池，提供了产生稳恒电流的电源。1820年，奥斯特发现了电流对磁针有力的作用，同年，安培确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似，这就把历来认为无关的现象——电和磁之间建立了联系。1826年，欧姆研究了通过电阻的电流和它两端电压的关系，后人把它称为欧姆定律。1831年，法拉第发现的电磁感应现象指出了把机械能转变为电能的可能性，对以后的电工技术发展起了推动作用。1833年，楞次建立了确定感应电流方向的定则（楞次定则）。以后，他致力于电机理论的研究，并阐明了电机可逆性原理。和楞次一起工作的雅可比于1834年发明了电动机，把电能转变为机械能。1864年，麦克斯韦提出了电磁场理论，从理论上推测到电磁波的存在，为无线电技术的发展奠定了理论基础。1867年，西门子发明了自激式发电机。1876年，雅布洛契柯夫创造了变压器。1881年，爱迪生兴建了火力发电站，电能的应用开始发展起来。同年，多里沃-多勃罗夫斯基发明了三相变压器，并提出了三相输电系

统,解决了远距离的电能输送问题。此后,大型电站如雨后春笋地建立起来,电力工业得到飞速发展,给人类带来工业电气化时代,导致了第二次工业革命。

电能之所以得到这样广泛的应用,因为它具有无可比拟的优越性,主要表现在下列三个方面:

1. 便于转换 电能和机械能的相互转换较为方便,利用发电机可将机械能转换为电能,利用电动机可将电能转换为机械能。将电能转换为热能、光能也是很方便的。

2. 便于输送 将电站发出的交流电用变压器升高电压后,可以输送到离电站很远的地方去。用户再用变压器将电压降低后,就可以供给用电器所需要的电能。

3. 便于控制 利用电动机带动生产机械,启动和停车时刻以及转速的快慢都可以按人们的需要加以控制。利用发电机产生电能,发电量也能按需要加以调节。

随着电能的广泛应用,变压器、电动机、发电机以及低压电器等,不仅在现代化的工农业生产中日益增多,而且在人们的日常生活中也到处可见。电风扇、洗衣机中有电动机,收录机、电视机中有变压器,洗衣机、电冰箱中有继电器等常用的低压电器。

电工技术的不断发展形成了《电工学》这门学科。从教学角度来看,电工学是研究电路基本规律和电磁现象在工程技术领域中应用的基础课程。它包含电路和电机、电器两个部分。前者介绍关于电路的基本概念、基本规律和分析电路的方法,它是学习本课程和后续课程的理论基础;后者介绍常用电机、电器的工作原理、运行特性和正确使用这些设备的方法。在此基础上,还要使学生受到电工实验技能的训练。通过这门课程的学习,不仅能提高未来物理教师讲授中学物理电学部分的能力,而且能使他们为中学开展有关电工技术的科技活动发挥一定的作用。

第一章 网络的基本分析方法

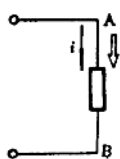
内 容 提 要

本章主要是复习和总结电磁学中有关电路部分的基本知识。先介绍电路变量参考方向(参考极性)的概念,以及这个概念在元件特性方程和基尔霍夫定律中所起的作用;接着介绍分析网络的两个常用方法——节点分析法和回路分析法;最后介绍二端网络瞬时功率表示式与有关电路变量参考方向配合的关系。

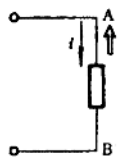
§ 1-1 参考方向和参考极性 电流和电压的波形

一、参考方向和参考极性

电流、电压等物理量统称为电路变量。电路变量的特点是具有“双向性”。众所周知,通过一段电路的电流实际方向,要么是从 A 流向 B (图 1-1-1(a),空心箭矢表示实际方向),要么是从 B 流向 A (图(b)),不会有第三种情况^①,这就是电流的双向性。具有双向性的标量称为双向标量,以区别于一般的标量(例如容积和比重)。要完整地描述双向标量,必须把它的大小和实际方向都表示出来。

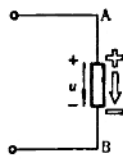


(a)

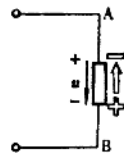


(b)

图 1-1-1



(a)



(b)

图 1-1-2

^① 电流等于零的情况已包含在所叙述的两种情况内。

为了能用代数量(正、负值)统一表示电流的大小和实际方向,必须引入参考方向的概念。在图 1-1-1 中,如果我们选定实心箭头所示的方向作为电流的参考方向,那么,当电流实际方向和它相同时取正值,相反时取负值。

我们知道,一段电路 AB 两端的电压就是 AB 之间的电位差。为了区别 A 、 B 两点电位的高低,通常用正极(见图 1-1-2,空心十号表示实际的高电位)表示高电位,负极(空心一号表示实际的低电位)表示低电位。用来表示实际电位高低的正、负极称为电压的实际极性。显然,电压的实际极性只有两种彼此相反的情况:要么 A 点为正极, B 点为负极(图 1-1-2(a)), 要么 A 点为负极, B 点为正极(图(b))。这就是电压实际极性的双向性^①。为了用代数量统一表示电压的大小和实际极性,需要引入参考极性的概念。在图 1-1-2 中,如果我们用实心的正(+)、负(-)号表示电压的参考极性,那么,当电压的实际极性和它相同时取正值,相反时取负值。

从电压实际极性的正极作一箭头指向负极,这个箭头的方向称为电压实际方向。从电压参考极性的正极作一箭头指向负极,这个箭头的方向称为电压参考方向。电压实际方向和参考方向相同时取正值,相反时取负值。

为简单起见, 电流和电压的实际方向以后均简称为电流和电压的方向。电压的实际极性简称为电压的极性。

从原则上讲,一段电路的电压和电流的参考方向是可以彼此独立地、任意地规定,这就是规定参考方向的任意性。因此,从表面上看,一段电路的电压和电流的参考方向配合有四种,如图 1-1-3 所示,但从实质上看只有两种:第一,电流和电压的参考方向相同(图(a)和(b)),这种配合称为无源惯例;第二,电流和电压

^① 双向性并不专指两个彼此相反的电流方向,也泛指两个彼此相反的电压极性。

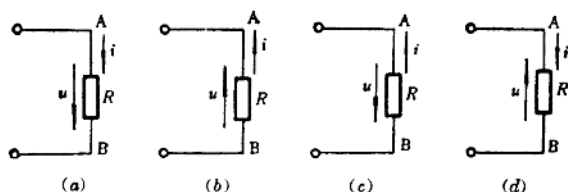


图 1-1-3

的参考方向相反,如图(c)和(d)所示。

规定参考方向还有习惯性,例如,对于一段不含源的电路,习惯上都采用无源惯例。后面就会看到,电路规律表示式的形式与有关电路变量的参考方向配合有关,为了尽可能使表示式简单化和单一化,应尽可能按照惯例来规定参考方向。读者在阅读后面的内容时必须注意这一点。

二、电流和电压的常见波形

电流和电压的大小和方向一般是随时间而变化的,分别称为时变电流和时变电压,用 $i(t)$ 和 $u(t)$ 表示。有时为简单起见,将 (t) 省去,直接用小写字母 i 和 u 表示。

最常见的时变电流和电压是正弦形电流和电压。正弦电流的表示式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1-1-1)$$

按上式作出的曲线(图 1-1-4)叫作波形图。在上式中, i 称为电流瞬时值, I_m 为最大值, ω 为角频率, $(\omega t + \varphi_0)$ 为相位角, φ_0 为初相位(图 1-1-4,横坐标为 ωt)。

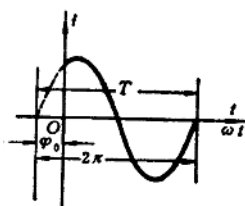


图 1-1-4

正弦电流完成一次周期性变化的时间叫做周期,用 T 表示(图 1-1-4,横坐标为 t)。从式(1-1-1)看出,当时间从 t 变为 $t' = t +$

$\frac{2\pi}{\omega}$ 时, 正弦电流完成一次周期性变化, 因此, 周期

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-1-2)$$

正弦电流每秒重复变化的次数叫做频率, 频率和周期的关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-1-3)$$

除正弦形电流和电压外, 常见的周期性非正弦电流(电压)有矩形波电流(电压)和三角波电流(电压), 如图 1-1-5 所示。

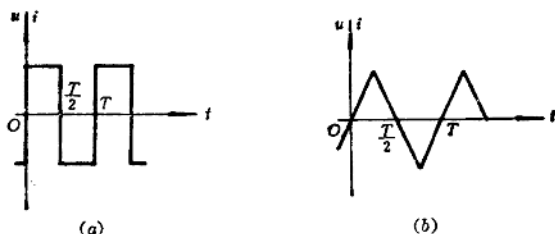


图 1-1-5

§ 1-2 元件的特性方程

电阻元件、电容元件、电感元件、电源等电路元件的电阻、电容、自感、电动势、电激流等统称为元件参数。元件两端电压及通过它的电流之间的关系式, 称为元件特性方程。

一、电阻元件的特性方程

电阻元件的特性方程, 就是一段电路的欧姆定律。其内容是: 当电阻两端加上电压时, 就会出现电流, 其方向和电压方向相同, 其数值和电压成正比。应该注意的是, 定律描述了两方面的内容: 其一是电流和电压方向之间的关系, 其二是电流和电压大小之间的关系。要把欧姆定律这两方面内容用表示式表示, 需要规定电