

11

高等学校电力类教材

电工技术

(第二版)

2

■ 李海 崔雪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

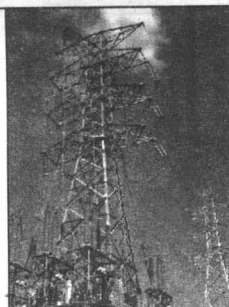
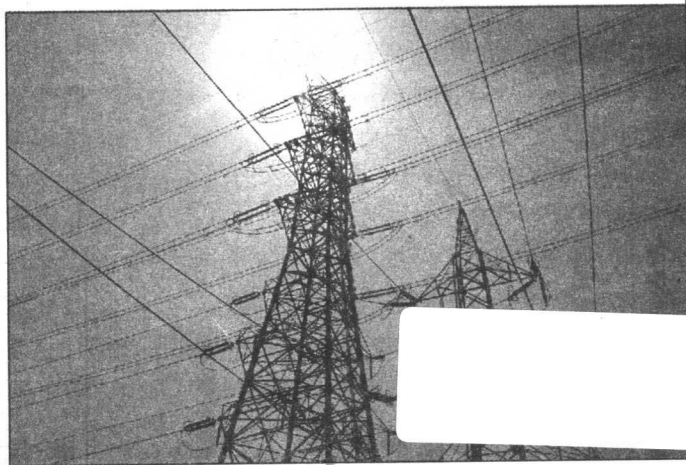
武汉大学出版社

● 高等学校电力类教材 ●

电工技术

(第二版)

■ 李海 崔雪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/李海,崔雪编著. —2版. —武汉:武汉大学出版社,2005.7
高等学校电力类教材
ISBN 7-307-04495-1

I. 电… II. ①李… ②崔… III. 电工技术 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 033764 号

责任编辑:李汉保 责任校对:王 建 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:26.125 字数:627千字

版次:1993年1月第1版 2005年7月第2版

2005年7月第2版第1次印刷

ISBN 7-307-04495-1/TM·13 定价:40.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书是1993年在武汉大学出版社出版的《电工技术》(第一版)的修订版,内容符合国家教育部颁布的《电工技术》(电工学I)教学基本要求。本书系统地介绍了电工技术的基本理论,其内容包括:电路模型与电路定律、电路定理和分析方法、正弦稳态的相量法、交流电路的频率特性、二端口网络、一阶电路、二阶电路、磁路与电器、常用控制电器、电动机及其控制、控制电机及应用、可编程控制器的编程及应用、电力生产概论及安全用电等。

本书适合作高等学校非电专业本科生电工学系列课程《电工技术》教材,也可以作其他强电、弱电结合专业的教材,以及供教师、学生与相关工程技术人员学习参考。

再版前言

近代科学技术的飞速发展,通常依靠综合多种学科的成果,即将多种技术结合起来而实现。现代仪器、机器多采用多种先进技术综合集成,从根本上说,是电工、电子技术的集成。当今,许多行业都离不开电工、电子技术。电工技术和电子技术是高等学校向非电专业学生开设的电类技术基础课程,该课程使学生从中获得电工技术和电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续课程和从事科学研究工作打下一定的基础。

本书是在第一版使用情况的基础上,考虑到电工、电子新技术的不断产生和发展,人们对电工、电子技术应用需求和内容的扩展要求,以及教学手段的不断改革等,作者结合现代科学技术飞速发展的新形势对第一版做了重新修订。本次修订保持了原书的基本风格和体系,在内容上做了大幅度改写和补充,力求使教材更加好教易学。

参加本次修订编写工作的有武汉大学电工电子基础教学基地电工学教学组教师崔雪(第9章~第12章)、宋元胜(第13章)、黎文安(第8章)、李海(第1章~第7章)。为此次修订工作付出辛勤劳动的还有汪应春、李世萍,全书由李海统稿、定稿。

本书引用了许多同仁的优秀成果,在此对原作者表示衷心感谢!

作 者

2004年12月

前 言

本书是根据国家教委颁发的高等工业学校电工技术课程的教学基本要求编写的。

随着现代科学技术的迅速发展,电工技术日益渗透到社会各个领域,电与非电专业的界线日趋模糊。为了适应新形势的需要,教育要“三个面向”,电工技术要着眼电路,面向系统,立足理论,加强应用,发挥数学助推作用,提高起点,将传统之精华与近代新成果融为一体。本书就是在这样的指导思想下编写的。

自1987年起,本书稿作为教材在武汉水利电力学院3个专业共4届14个班先后使用。其间曾经反复修订完善,于1992年6月定稿。

本书特点是,融传统精华与近代新成果为一体,注重内容的纵向关系,同时有横向沟通。书中文字及图形符号采用国标规定符号。为拓宽知识面和适应不同专业使用,部分内容采用“*”标示,以便选择。

本书承蒙武汉水利电力学院罗九儒副教授主审。杨宪章教授、陈道舜教授、陈邕怀、洪文秀、伍爱莲、庄曰平副教授也分别审阅过有关内容,他们对书稿提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中得到了教研室及各有关部门的大力支持,在初稿试用时得到了张立宏老师及各位同仁的大力协助,在出版过程中得到武汉大学出版社、武汉水利电力学院印刷厂及有关同志的热情支持,借此机会向上述单位和同志以及为此书出版付出辛勤劳动的所有同志谨致衷心的感谢。

限于水平,书中若有谬误欠妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

一九九二年十月于珞珈山

目 录

电路基础篇

第 1 章 电路模型及基本定律	1
§ 1.1 电路及其基本物理量	1
1.1.1 电路及其分类	1
1.1.2 电路元件及其种类	2
1.1.3 基本变量	2
1.1.4 物理量的方向	3
1.1.5 激励和响应	3
§ 1.2 电路模型	5
1.2.1 建模思想及依据	5
1.2.2 基本元件	6
1.2.3 实际电源的电路模型	11
§ 1.3 电路基本定律	12
1.3.1 电路结构术语	12
1.3.2 基尔霍夫两定律	14
§ 1.4 元件联接及等效简化	16
1.4.1 电阻元件的串、并联	16
1.4.2 元件的星形联接与三角形联接	17
1.4.3 理想电源元件间的联接	18
§ 1.5 实际元件工作的状态和范围	21
1.5.1 工作范围及额定值	21
1.5.2 电路工作状态	21
习题 1	23
第 2 章 网络分析方法与网络定理	26
§ 2.1 简单电路计算	26
2.1.1 电阻的串联分压	26
2.1.2 电阻的并联分流	27
§ 2.2 电位的计算及电路的简化表示	29
§ 2.3 网络变换	31

2.3.1 星形网络与三角形网络的等效变换	31
2.3.2 有源支路等效变换	32
2.3.3 输入电阻与等效电阻	34
§ 2.4 网络方程法	34
2.4.1 支路电流法	34
2.4.2 结点电压法	36
§ 2.5 电路定理	40
2.5.1 齐性原理	40
2.5.2 叠加原理	41
2.5.3 替代定理	43
2.5.4 戴维南-诺顿定理	44
2.5.5 最大功率传输定理	47
§ 2.6 含受控电源电路的分析方法	49
§ 2.7 非线性电阻电路分析	51
2.7.1 非线性电阻网络的基本概念	51
2.7.2 非线性电阻参数	53
2.7.3 非线性电阻电路分析方法	54
习题 2	57

第 3 章 正弦交流电路	61
§ 3.1 正弦交流电的基本概念	61
3.1.1 正弦量的三要素	61
3.1.2 正弦量的有效值	63
§ 3.2 正弦量的相量表示	64
3.2.1 电工中常用的复数知识	64
3.2.2 算子 $\text{Im}[\]$ 的运算规则	66
3.2.3 正弦量的相量表示法	66
3.2.4 正弦量微分与积分的相量	68
§ 3.3 电路约束的相量形式	70
3.3.1 元件 VCR 的相量形式	70
3.3.2 基尔霍夫定律的相量形式	72
§ 3.4 复阻抗与复导纳	73
3.4.1 RLC 串联电路·复阻抗	73
3.4.2 RLC 并联电路复导纳的计算	77
3.4.3 广义电路元件	78
§ 3.5 正弦稳态分析的相量法	80
3.5.1 交流串联电路	81
3.5.2 交流并联电路	82
3.5.3 复杂网络的计算	84

§ 3.6 正弦交流电路的功率	86
3.6.1 交流电路的功率概念	86
3.6.2 RLC 元件的功率特性	87
3.6.3 阻抗元件的功率三角形	90
§ 3.7 功率因数的提高	91
习题 3	94
第 4 章 三相电路	100
§ 4.1 三相电路的概念	100
§ 4.2 三相电压	100
4.2.1 三相电源	100
4.2.2 三相电压	101
§ 4.3 对称三相电路及其计算	103
4.3.1 负载星形联接	103
4.3.2 负载三角形联接	104
§ 4.4 三相电路的功率	105
习题 4	108
第 5 章 非正弦交流电路	110
§ 5.1 非正弦交流电路的计算	110
5.1.1 非正弦周期量的傅里叶级数	110
5.1.2 非正弦周期量的有效值	111
5.1.3 非正弦电路的分析步骤	112
5.1.4 非正弦交流电路的功率	112
§ 5.2 非正弦波的频谱	119
5.2.1 频谱的意义	119
5.2.2 复数频谱	119
§ 5.3 网络函数	122
5.3.1 网络函数的概念	122
5.3.2 网络函数的几种表示法	123
§ 5.4 RC 电路的频率特性	123
5.4.1 一阶 RC 电路的频率特性	123
5.4.2 二阶带通电路	126
§ 5.5 LC 电路的频率特性	128
5.5.1 LC 电路的特性参数	128
5.5.2 串联谐振	129
5.5.3 LC 电路的谐振	130
习题 5	132

第 6 章 电路的暂态分析	135
§ 6.1 暂态分析中的相关概念	135
6.1.1 产生暂态的原因	135
6.1.2 换路定则及 LC 的暂态模型	136
6.1.3 零输入与零状态	137
§ 6.2 RC 一阶电路的零输入响应	140
6.2.1 RC 电路的零输入响应	140
6.2.2 时间常数	141
§ 6.3 RC 一阶电路的零状态响应	143
§ 6.4 RC 一阶电路的全响应及三要素法	147
6.4.1 全响应	147
6.4.2 全响应的求解	147
6.4.3 一阶电路的三要素法	149
§ 6.5 微分电路与积分电路	151
6.5.1 RC 电路对矩形波的响应	151
6.5.2 微分电路	152
6.5.3 积分电路	154
6.5.4 耦合电路	154
6.5.5 加速电路	155
§ 6.6 RL 一阶电路的暂态分析	156
6.6.1 零输入响应	156
6.6.2 零状态响应	157
6.6.3 全响应	158
§ 6.7 二阶电路的暂态分析	160
6.7.1 二阶电路的零输入响应	160
6.7.2 二阶电路的零状态响应	165
习题 6	166
第 7 章 二端口网络	171
§ 7.1 二端口网络	171
§ 7.2 二端口网络的参数	172
7.2.1 二端口网络的 Y 参数	172
7.2.2 二端口网络的 Z 参数	174
7.2.3 二端口网络的 A 参数	175
7.2.4 二端口网络的 H 参数	176
§ 7.3 二端口网络的联接及等效电路	177
7.3.1 并-并式联接	177
7.3.2 串-串式联接	179
7.3.3 级联	180

目 录	5
§ 7.4 二端口网络的等效电路	181
习题 7	182

技术应用篇

第 8 章 磁路与电器	184
§ 8.1 磁路及其计算	184
8.1.1 磁路的基本知识	184
8.1.2 磁路及其基本定律	186
8.1.3 磁路的计算	189
§ 8.2 交流铁芯线圈	191
8.2.1 铁芯线圈中的物理过程	191
8.2.2 感应电势的计算	192
8.2.3 电压和电流的关系	193
8.2.4 铁芯线圈中的功率	193
8.2.5 互感及端钮极性	195
§ 8.3 变压器	196
8.3.1 基本原理	197
8.3.2 变压器的功能	198
8.3.3 变压器的外特性和效率	203
* 8.3.4 三相变压器	204
* 8.3.5 自耦变压器	206
* 8.3.6 仪用互感器	207
§ 8.4 常用电器	209
8.4.1 电磁铁	209
8.4.2 主令电器	213
8.4.3 交流接触器	215
8.4.4 继电器	216
8.4.5 熔断器和断路器	220
习题 8	223
第 9 章 交流电动机	226
§ 9.1 异步电动机的构造	226
9.1.1 定子	226
9.1.2 转子	227
§ 9.2 三相异步电动机的工作原理	228
9.2.1 旋转磁场	228
9.2.2 异步电动机的转动原理	231
§ 9.3 三相异步电动机的电路	232

9.3.1 定子电路	232
9.3.2 转子电路	233
§ 9.4 异步电动机的转矩与机械特性	234
9.4.1 电源电压对电磁转矩的影响	234
9.4.2 转矩特性	235
9.4.3 机械特性	236
§ 9.5 异步电动机的使用	239
9.5.1 异步电动机的铭牌	239
9.5.2 三相异步电动机的起动	240
9.5.3 三相异步电动机的调速	243
9.5.4 三相异步电动机的制动	245
9.5.5 电动机继电保护	246
§ 9.6 单相异步电动机*	247
9.6.1 单相异步电动机的工作原理	248
9.6.2 单相异步电动机的类型与起动方法	250
§ 9.7 同步电动机*	252
9.7.1 同步电动机的工作原理	252
9.7.2 转子结构及励磁	253
9.7.3 电磁关系及电压平衡方程	253
9.7.4 同步电动机的特性	255
9.7.5 同步电动机的起动	256
习题 9	256

第 10 章 异步电动机的控制	260
§ 10.1 基本控制电路	260
10.1.1 点动控制	260
10.1.2 自锁控制	261
10.1.3 互锁控制	262
10.1.4 时间控制	264
10.1.5 行程控制	265
10.1.6 顺序控制	267
§ 10.2 继电器接触器控制系统及应用	269
10.2.1 多地点操作一台电动机控制电路	269
10.2.2 三相异步电动机 Y— Δ 起动控制电路	269
10.2.3 三相异步电动机能耗制动控制电路	270
10.2.4 机床润滑定时给油自动控制电路	271
§ 10.3 可编程序控制器	272
10.3.1 可编程控制器的结构与工作原理	272
10.3.2 可编程控制器的程序编制和指令系统	277

10.3.3 可编程控制器的应用编程	302
§ 10.4 异步电动机的电子控制*	320
10.4.1 异步电动机的软起动	320
10.4.2 异步电动机的变频调速	322
习题 10	332
第 11 章 直流电动机	337
§ 11.1 直流电动机的构造	337
11.1.1 直流电动机的定子部分	337
11.1.2 直流电动机的转子部分	339
§ 11.2 直流电动机的工作原理	339
11.2.1 直流发电机的工作原理	340
11.2.2 直流电动机的工作原理	340
11.2.3 直流电动机的励磁方式	341
§ 11.3 直流电动机的基本特性	343
11.3.1 转速特性	343
11.3.2 转矩特性	344
11.3.3 机械特性	345
§ 11.4 直流电动机的起动、调速和制动	346
11.4.1 直流电动机的起动	346
11.4.2 直流电动机的调速	347
11.4.3 直流电动机的制动与反转	350
习题 11	351
第 12 章 控制电机及其控制系统	353
§ 12.1 自动控制的基本概念	353
12.1.1 概述	353
12.1.2 开环控制与闭环控制	353
12.1.3 控制系统的构成	354
12.1.4 控制系统的性能指标	355
§ 12.2 伺服电动机及其控制	356
12.2.1 伺服电动机的基本结构与工作原理	356
12.2.2 伺服电动机的驱动与控制系统	359
§ 12.3 步进电动机及其控制	361
12.3.1 步进电动机的基本结构与工作原理	361
12.3.2 步进电动机的驱动与控制	365
§ 12.4 测速发电机	367
12.4.1 直流测速发电机	367
12.4.2 交流测速发电机	368

12.4.3 测速发电机的应用	370
§ 12.5 自整角机	371
12.5.1 控制式自整角机	371
12.5.2 力矩式自整角机	373
12.5.3 自整角机的应用	375
习题 12	375
第 13 章 电力生产与安全用电	376
§ 13.1 电力系统概述	376
13.1.1 电力系统与电力网	376
13.1.2 发电厂及变电所类型	377
13.1.3 电力系统的电压等级	378
§ 13.2 导线截面的计算与选择	378
13.2.1 根据发热条件选择导线截面	379
13.2.2 根据允许电压损失选择导线截面	379
§ 13.3 安全用电与防范措施	381
13.3.1 触电	382
13.3.2 防范措施	383
§ 13.4 安全用电与触电急救常识	388
13.4.1 安全用电常识	388
13.4.2 触电急救常识	389
部分习题答案	390
参考文献	401

第1章 电路模型及基本定律

近数十年来,电工、电子技术发展十分迅速,现代一切新的科学技术无不与电有密切的关系。因此,人们愈易清楚地认识到电工技术在现代社会中的价值。在这样的形势下,作为未来的工程师及科技工作者,掌握电工技术的相关理论知识和技能是极为重要的。

学习电路知识主要应掌握电路的基本规律及其计算方法,从而了解典型电路的特性,为今后的实际工作做好理论准备。但是,书本中所能学到的电路知识毕竟是有限的,而今后工作中可能遇到的电路问题则是千变万化、层出不穷的。因此,我们应立足于掌握一些分析问题的方法,这样将会终生受益,对解决实际问题就能得心应手,应付自如。本章将从最一般的分析方法入手,即建立实际装置的物理模型,进而遵照电路的基本规律建立其数学模型,由此引出一些基本概念以及后面各章的学习内容。因此,本章是全书的基础。

§ 1.1 电路及其基本物理量

1.1.1 电路及其分类

1. 电路的组成

由电气装置和器件组成,为完成能量或信号的转换、电能的输送和分配以及信号的传递和处理的系统,叫做电路。习惯上把这种电路叫做实际电路。

任何一个实际电路都是由电能(或信号)源、电能接受器以及中间环节三部分组成。

电能(或信号)源,如发电机、信号发生器、蓄电池、温差电池、干电池等,它们将其他形式的能量转换成电能。

电能接受器用来将电能转换成其他形式的能量。如电动机、加热器、电灯、永磁式扬声器等都属于接受器。在电路中接受器习惯上称为负载。

中间环节用来连接电源和接受器(负载),抑制或放大确定的信号分量(如滤波器,放大器),改变电路其他部分的电压和电流水平(如变压器),等等。

我们在研究这些实际电路的特性时,往往不是以这些实际的装置和器件作为讨论对象,而是对这些装置和器件的电磁特性进行科学地抽象与概括,用一些模型来代表实际装置和器件的外部功能。用这些模型元件按一定规则进行组合来描述实际装置的主要电磁性能。

由此可知,我们的研究对象,已不是看得见摸得着的实际装置,而是一些理想模型,以及由它们相互连接所构成的各种电路图,习惯上称之为电路。在后面所谈到的电路,都是指的电路图。

电路按其功能可以分为传输或分配电能(如电力系统)与传递或处理信号之用(如无线电技术、通信技术等电路)的两大类。

2. 电路中的物理过程

(1) 能量类型

$$\text{能量} \begin{cases} \text{电磁能量(电能)} \begin{cases} \text{磁场能量} \\ \text{电场能量} \end{cases} \\ \text{非电磁能量(非电能)} \end{cases}$$

(2) 电路中的物理过程

电路中的物理过程主要是能量转换和能量交换。能量转换是指电能与非电能间的转换,能量交换是指电场能量与磁场能量的交换。

在电能转换成非电能的过程中,将伴随着能量的交换。电能转换成非电能要消耗电能,称能量消耗或消耗有功。而电能和磁能的交换没有电能损耗,电工中称之为消耗无功。

1.1.2 电路元件及其种类

用来代表实际装置外部功能的物理模型称为电路符号,习惯上又叫做电路元件,简称元件。电路中的每个元件都有确定的引出端钮,借助引出端钮元件间相互连接。

电路的实际装置可以用这些元件端钮上的有关物理量的代数方程或微分方程来描述,当然只能是近似地描述所研究的实际装置,只要模型取得越精确,则理论分析的结果与实际情况越吻合。

电路元件按其引出端钮数目一般分为二端元件与多端元件,从能量的角度出发,电路元件又可以分为有源元件与无源元件。能源属于有源元件,放大器件(如电子管、晶体管、运算放大器等)属于有源元件;消耗或储存电能的元件(如电阻、电感线圈、电容器、变压器等)都属于无源元件。按其元件的数学模型,元件又分为线性和非线性两大类。元件还可以按其他的条件分类,这里不一一介绍了。

1.1.3 基本变量

所谓基本变量是指能用它们方便地表示出电路中其他各物理量。电路问题的基本描述量是沿用物理学中有关电学的基本物理量。这些基本物理量一般分为基本变量与基本复合变量两大类。

基本变量如:电流 i 、电压 u 、电荷 q 、磁通 ϕ 等。

基本复合变量如:功率 p 、能量 w 等。

为了便于使用,对本书中用得较多的三个变量,即电压、电流和功率略加回顾。

1. 电压

电压是电路中两点电位之差值,即电位差,在数值上等于将单位正电荷从一点移到另一点时所获得的能量。可以表示为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-1)$$

法拉第(Faraday)发现:线圈两端之间的电压还可以简单地表示为

$$u = \frac{d\phi}{dt} \quad (1-2)$$

其中:电压的单位为伏特(V),电荷的单位为库仑(C),能量的单位为焦耳(J),磁通的单位

为韦伯(Wb),时间的单位为秒(s)。

2. 电流

电荷的定向运动就形成电流,其大小等于单位时间通过导体横截面的电量,表示为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-3)$$

电流的单位为安培(A),电荷的单位为库仑(C)。

如果电压和电流的大小和方向不随时间变化,则称为直流电。分别用英文大写字母 U 和 I 表示。

3. 功率

单位时间内电路消耗(或吸收)的能量称为功率,可以表示为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

功率的单位是瓦特(W)。

若每秒消耗一焦耳的电能,则其功率为一瓦特,于是功率表达式可以改写成

$$p = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt}$$

应用式(1-1)和式(1-3)可得

$$p = ui \quad (1-5)$$

结果表明,功率是两个基本变量的乘积,即可以用基本变量表示,故称 p 为复合变量。对直流电,则功率为

$$P = UI \quad (1-6)$$

1.1.4 物理量的方向

电压、电势存在着高低电位端之分,电激流、电流存在着流向,习惯上称之为方向。在电路计算中常用到实际方向和参考方向两个术语。

1. 实际方向

所谓实际方向,系指反映物理量物理意义的方向。电压为由高电位指向低电位;电势则是由低电位指向高电位;电流在外电路由高电位流向低电位;在电源内部由低电位流向高电位。

在电路分析计算时,要根据电路定律建立电路方程,而在建立电路方程时需要知道电压、电流的方向。然而,在绝大多数情况下,特别是一些复杂电路,是很难事先直观判定各电压、电流的实际方向的,为了解决这一矛盾引进参考方向。

2. 参考方向

所谓参考方向(或正方向),是指为了定量分析计算而事先假定的电压、电流方向,电流多用箭头“→”标注,而电压多用“+”、“-”极性标注。

电压、电流方向的选择,原则上讲是任意的,但当把同一元件上的电压和电流方向选择一致时,则给电路分析带来很多方便,这种组合选择,称为关联参考方向。

1.1.5 激励和响应

向电路输入信号(或作为能源,向电路输入能量推动电路工作的电压或电流)称为激