



普通高等教育“十二五”规划教材

电工技术

电工学 I

第2版

杨 风 主编



普通高等教育“十二五”规划教材

电工技术（电工学 I）

第 2 版

主 编	杨 风	
副主编	严利芳	吴其洲
参 编	郎文杰	宋小鹏
主 审	毕满清	



机械工业出版社

本书是以教育部颁发的《高等学校工科本科电工技术（电工学 I）课程教学基本要求》为依据，结合多年的教学实践经验编写的，以适应不同专业的教学需要。

全书共 14 章，包括电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流电路稳态分析、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的暂态分析、磁路与变压器、电动机、继电-接触控制电路、可程序控制器及其应用、电工测量与非电量电测、安全用电、基于 MATLAB 的电工技术辅助分析、基于 PSpice 的电工技术辅助分析。

本书可作为高等学校工科非电类本科、高职高专及成人教育的教材或参考书，也可作为相关学科工程技术人员的实用参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目（CIP）数据

电工技术. 电工学. I / 杨风主编. —2 版. —北京:
机械工业出版社, 2013. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 43326 - 2

I. ①电… II. ①杨… III. ①电工技术 - 高等学校 -
教材②电工学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 159046 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤 徐 凡
版式设计：霍永明 责任校对：李锦莉
责任印制：刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2014 年 6 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm × 260mm · 19.5 印张 · 477 千字
标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 43326 - 2
定价：39.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心：(010)88361066

教 材 网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010)68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“电工技术”是非电专业学生进行电气工程教育的一门非常重要的技术基础课。本课程包括学习电工、电子技术必备的电路理论和应用技术,学完本课程,学生应掌握电路分析的基本思路和方法,熟悉电动机、变压器的使用,了解安全用电常识,了解现代电工技术在实际工作中的典型应用。

本书是在第1版的基础上,结合使用过程中的教学实践经验重新修订的,以适应不同层次和专业的教学需要。

本次修订主要修改如下:

1. 突出内容与实际问题的关联性,每章通过对一些应用性问题讨论将学习的内容引出。
2. 重新修改、补充了各章、节的例题、自测题、习题。
3. 增加了 MCGS 监控软件在控制三相异步电动机运行中的应用。
4. 加强与后续课程的联系,扩充知识面。
5. 引入了 MATLAB、PSpice 仿真软件。

全书分为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、三相正弦交流电路、非正弦周期信号电路、电路的瞬态分析、磁路与变压器、电动机、继电-接触控制电路、可编程序控制器及其应用、电工测量与非电量电测、安全用电、仿真软件简介及应用共14章内容。

本着因材施教、循序渐进和能力培养的要求,也为了便于教与学,本书的各章开头有内容提要、讨论问题,后面有小结,并配有思考题、自测题和习题,在题目的选配和数量上,十分强调针对性与实用性。书中还编入了一些带*的内容,如电阻的Y- Δ 联结与等效变换、戴维宁定理的证明、电路的谐振、频率响应、交流铁心线圈的等效电路、电磁铁等,供教师选讲和学生延伸与拓宽知识之用。

本书由中北大学杨风、严利芳、吴其洲、郎文杰、宋小鹏编写。杨风编写了第11、12章,严利芳编写了第1、2、7章,吴其洲写了第8、9、10章,郎文杰编写了第5、6章,宋小鹏编写了第3、4、13、14章,杨风任主编,负责全书的组织、修改和定稿,严利芳、吴其洲任副主编,协助主编工作。

本书由全国高等学校电子技术研究会常务理事、华北地区高等学校电子技术教学研究会副理事长、山西省高等学校电子技术教学研究会理事长、中北大学毕满清教授担任主审。毕满清教授对书稿进行了认真的审查,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,不妥和错误之处在所难免,恳请使用本书的广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第1章 电路的基本概念和基本定律 1

1.1 电路组成与电路模型的概念 2

1.1.1 电路与电路组成 2

1.1.2 电路模型 2

1.1.3 网络与系统 3

1.2 电流、电压及其参考方向 3

1.2.1 变量与参数的概念和符号规定 3

1.2.2 电流、电压、电位 4

1.2.3 电流、电压的参考方向 4

1.3 电路的功与功率计算 5

1.3.1 电路的功与功率 5

1.3.2 功率的计算 6

1.4 基尔霍夫定律 8

1.4.1 电路基本术语的介绍 8

1.4.2 基尔霍夫电流定律 8

1.4.3 基尔霍夫电压定律 9

1.4.4 基尔霍夫定律的应用 10

1.5 电阻、电感、电容 11

1.5.1 电阻元件 11

1.5.2 电感元件 12

1.5.3 电容元件 15

1.6 电源 17

1.6.1 电路的工作状态 17

1.6.2 电压源 18

1.6.3 电流源 18

1.6.4 受控源 20

1.7 电路中电位的计算 21

本章小结 22

自测题 22

习题 24

第2章 电路的分析方法 28

2.1 电阻的连接方式与等效变换 29

2.1.1 电阻的串联与并联 29

*2.1.2 电阻的 Y - Δ 联结与等效变换 29

2.2 电源的等效变换 31

2.2.1 电源的组合特性 31

2.2.2 实际电源的等效变换 33

2.3 叠加定理 35

2.3.1 线性电路及其性质 35

2.3.2 叠加定理及其应用 35

2.3.3 齐性定理 37

2.4 节点电压法 38

*2.4.1 节点电压法推导 38

2.4.2 弥尔曼定理 39

2.5 戴维南定理和诺顿定理 40

2.5.1 戴维南定理的提出 40

*2.5.2 戴维南定理的证明 41

2.5.3 戴维南定理的推论—诺顿

定理 43

*2.5.4 求戴维南等效电阻的一般

方法 43

2.6 非线性电阻电路的分析 45

2.6.1 非线性元件 45

2.6.2 非线性电阻电路的图解分析 46

本章小结 47

自测题 48

习题 49

第3章 正弦交流电路稳态分析 55

3.1 正弦量的基本概念 55

3.1.1 正弦量 55

3.1.2 周期和频率 56

3.1.3 幅值和有效值 56

3.1.4 相位差 57

3.2 相量法 58

3.2.1 复数及其基本运算 58

3.2.2 正弦量的相量表示 59

3.2.3 相量法的应用 60

3.2.4 基尔霍夫定律的相量形式 61

3.3 基本无源元件的正弦交流电路 61

3.3.1 电阻元件的正弦交流电路 61

3.3.2 电感元件的正弦交流电路 63

3.3.3 电容元件的正弦交流电路 64

3.4 阻抗和导纳 66

3.4.1 复阻抗	66	6.1 概述	110
3.4.2 复导纳	67	6.2 换路定律及初始值的确定	111
3.4.3 阻抗的串并联	68	6.2.1 换路定律	111
3.5 正弦交流电路的功率	69	6.2.2 初始值的计算	112
3.5.1 有功功率	69	6.3 一阶电路的零输入响应	113
3.5.2 无功功率	70	6.3.1 一阶 RC 电路的零输入响应	113
3.5.3 视在功率	71	6.3.2 一阶 RL 电路的零输入响应	116
3.6 功率因数的提高	72	6.4 一阶电路的零状态响应	117
3.7 正弦交流电路稳态分析	74	6.4.1 一阶 RC 电路的零状态响应	118
*3.8 电路的谐振	76	6.4.2 一阶 RL 电路的零状态响应	119
3.8.1 串联谐振	77	6.5 一阶电路的全响应和三要素法	121
3.8.2 并联谐振	78	6.5.1 一阶电路的全响应	121
*3.9 频率响应	79	6.5.2 三要素法	124
3.9.1 RC 低通滤波器	79	6.6 一阶电路的矩形脉冲响应	127
3.9.2 RC 高通滤波器	80	6.6.1 RC 微分电路	127
本章小结	81	6.6.2 RC 积分电路	128
自测题	82	本章小结	129
习题	84	自测题	130
第4章 三相电路	88	习题	131
4.1 三相电源	88	第7章 磁路与变压器	136
4.1.1 三相电源的产生	88	7.1 磁路的基本概念和基本性质	136
4.1.2 三相电源的供电方式	90	7.1.1 磁路及其基本物理量	137
4.2 三相负载的连接	91	7.1.2 磁路的基本定律	138
4.2.1 三相负载的星形联结	92	7.2 铁磁材料	140
4.2.2 三相负载的三角形联结	93	7.2.1 铁磁材料的磁性能	140
4.3 对称三相电路的计算	93	7.2.2 铁磁材料的分类	141
4.4 三相电路的功率	95	7.2.3 铁磁材料的磁化曲线	141
本章小结	96	7.3 直流磁路计算	142
自测题	97	7.4 交流磁路与交流铁心线圈	144
习题	97	7.4.1 交流铁心线圈中的电磁关系	144
第5章 非正弦周期电流电路	100	7.4.2 交流铁心线圈中的功率损耗	145
5.1 非正弦周期量的分解	100	*7.4.3 交流铁心线圈的等效电路	146
5.2 非正弦周期电流电路中的有效值、 平均值和平均功率	102	7.5 变压器	147
5.2.1 有效值	102	7.5.1 变压器的基本结构	147
5.2.2 平均值	103	7.5.2 变压器的工作原理	148
5.2.3 非正弦周期电流电路的平均 功率	103	7.5.3 变压器的运行特性	150
5.3 线性电路在非正弦激励下的计算	104	7.5.4 其他类型的变压器	152
本章小结	106	*7.6 电磁铁	154
自测题	107	7.6.1 电磁铁的基本结构	154
习题	108	7.6.2 电磁铁吸力的计算	154
第6章 电路的暂态分析	110	本章小结	156
		自测题	156
		习题	157

第 8 章 电动机	159	10.1 可编程序控制器的结构和工作	205
8.1 三相异步电动机的结构	159	原理	205
8.2 三相异步电动机的工作原理	161	10.1.1 PLC 的一般结构	205
8.3 三相异步电动机的电磁转矩和		10.1.2 PLC 的基本工作原理	206
机械特性	163	10.1.3 PLC 的分类及应用场合	207
8.3.1 等效电路参数	163	10.2 可编程序控制器的技术性能指标	208
8.3.2 电磁转矩	164	10.2.1 PLC 的基本技术指标	208
8.3.3 机械特性	165	10.2.2 FP1 性能介绍	209
8.4 三相异步电动机的铭牌数据	166	10.2.3 FP1 的内部寄存器及 I/O	
8.5 三相异步电动机的起动、制动、		配置	209
调速	167	10.3 可编程序控制器 FP1 的基本指令	212
8.5.1 三相异步电动机的起动	167	10.4 PLC 编程的基本原则和技巧	218
8.5.2 三相异步电动机的制动	172	10.4.1 编程的基本原则	218
8.5.3 三相异步电动机的调速与控制		10.4.2 编程技巧	219
技术	175	10.5 PLC 控制系统的设计	220
*8.6 单相异步电动机	179	10.5.1 PLC 的应用设计步骤	220
*8.7 直流电动机	181	10.5.2 PLC 控制系统设计举例	220
8.7.1 直流电动机的基本结构	181	本章小结	223
8.7.2 直流电动机的分类	182	习题	224
8.7.3 直流电动机的工作原理	182	第 11 章 电工测量与非电量电测	226
8.7.4 直流电动机的机械特性	183	11.1 常用电工仪表	226
8.7.5 直流电动机的起动	183	11.1.1 电工测量仪表、仪器的分类	226
8.7.6 直流电动机的调速方法	184	11.1.2 磁电系测量仪表	227
*8.8 控制电动机	185	11.1.3 电磁系测量仪表	229
8.8.1 伺服电动机	185	11.1.4 电动系测量仪表	230
8.8.2 测速发电机	186	11.1.5 万用表	232
8.8.3 步进电动机	187	11.1.6 兆欧表	234
本章小结	188	11.2 电桥法比较测量	236
自测题	189	11.2.1 用直流电桥测量电阻	237
习题	189	11.2.2 用交流电桥测量电感、电容	238
第 9 章 继电-接触控制电路	191	11.3 非电量电测	239
9.1 常用低压控制电器	191	11.3.1 温度的检测	239
9.1.1 手动电器	191	11.3.2 转速的检测	243
9.1.2 自动电器	193	11.3.3 压力的检测	247
9.2 继电-接触控制系统举例	197	本章小结	249
9.2.1 继电-接触控制电路的阅读		第 12 章 安全用电	250
方法	197	12.1 触电及安全保障措施	250
9.2.2 电动机继电-接触器控制电路	197	12.1.1 电击	250
本章小结	201	12.1.2 电伤	251
自测题	201	12.1.3 触电的形式	251
习题	202	12.1.4 电气安全的基本要求	251
第 10 章 可编程序控制器及其应用	204	12.1.5 家庭安全用电	252
		12.1.6 电气事故的紧急处置	253

12.2 电气接地和接零	253	13.3.4 频率特性分析	269
12.2.1 工作接地	253	13.4 MATLAB 电工技术图形化仿真	270
12.2.2 保护接地	254	第 14 章 基于 PSpice 的电工技术	
12.2.3 接地保护的原理	254	辅助分析	277
12.2.4 不重复接地的危险	255	14.1 PSpice 概述	277
12.2.5 对接地系统的一般要求	255	14.2 PSpice 电路描述语言	278
本章小结	256	14.2.1 文本文件格式	278
第 13 章 基于 MATLAB 的电工技术		14.2.2 元器件描述语句	278
辅助分析	257	14.2.3 分析类型语句	279
13.1 MATLAB 概述	257	14.2.4 输出语句	281
13.1.1 MATLAB 简介	257	14.2.5 输出变量	281
13.1.2 MATLAB 的基本界面	258	14.3 PSpice 的视窗操作	282
13.1.3 MATLAB 的主要功能	259	14.3.1 原理图绘制	282
13.2 MATLAB 常用命令及基本操作	260	14.3.2 仿真分析	284
13.2.1 变量、数值和表达式	260	14.4 PSpice 在电工技术课程中的	
13.2.2 矩阵的表示	261	应用	286
13.2.3 矩阵的运算	261	14.4.1 直流工作点分析	286
13.2.4 MATLAB 二维绘图	263	14.4.2 直流扫描分析	287
13.3 电工技术课程 MATLAB 辅助		14.4.3 交流扫描分析	289
分析	265	14.4.4 瞬态分析	291
13.3.1 直流电路分析	266	自测题与习题参考答案	293
13.3.2 交流电路分析	266	参考文献	301
13.3.3 时域电路分析	267		

第1章 电路的基本概念和基本定律

内 容 提 要

- 理解电路模型的概念，电流、电压参考方向的意义，掌握元件吸收或发出功率的计算。
- 基尔霍夫电流定律和电压定律是分析电路的基本定律，要深入理解这两个定律的内容并能正确应用，熟练掌握各种基本元件的伏安关系和能量关系。
- 了解电路的有载工作、开路与短路状态，理解额定值的意义，会计算电路中各点的电位。

讨 论 问 题

- 实际电路与电路模型有何联系和区别？
- 为什么要引入电流、电压的参考方向？参考方向在电路分析中有何作用？
- 怎样判断元件上功率的吸收与发出情况？
- 基尔霍夫电流定律和电压定律的适用范围是什么？应用中要注意哪些问题？
- 电阻、电感、电容这些电路基本模型的伏安关系和能量关系是怎样的？各元件又有什么样的特点？
- 实际电源与理想电源有什么区别？怎样理解受控源？

电作为一种能源，同阳光、水、空气一样，是人类不可缺少的伙伴。但是历史也血迹斑斑地证明了电是一匹难以驯服的野马，当你还没有驯服这匹野马的时候，在生活或工作中就会出现触电、电击、烧伤、火灾以及设备损坏、财产损失，从而造成不可估量的损失。电能能否造成实际伤害在于电流大小以及电流如何流过受害者的身体。确定一个电源是否存在危险电流，以及在什么条件下存在潜在的危险电流，是非常困难的，这需要懂得一些电气知识，如：电压与电流如何产生、如何度量以及它们之间有何关系；如何确定复杂的实际电路中电压与电流值；可以利用什么样的规律分析和理解电路中的电现象等。

这些知识都涉及电路理论。在工程技术实际和生活实际中，电路理论有非常广阔的应用。从简单的照明电路，到复杂的电力系统；从单个的手机、收音机、电视机，到卫星通信网络、计算机互联网，都与电路理论有一定的关系。可以说，只要在涉及电能的产生、传输和使用的地方，就有电路理论的应用。而在信息产生、信息传递、信息处理的绝大多数场合，都可见到电路理论应用的例子。电路理论已经与我们的生活密不可分。

1.1 电路组成与电路模型的概念

1.1.1 电路与电路组成

简单来说,电路就是电流流通的路径,是由若干的电气设备按照一定的方式用导线连接起来,构成电流的通路,也可以称为电网络。电路是能够传输能量、转换能量或者是能够采集电信号、传递和处理电信号的有机整体。

电路的繁简、大小不等,有的电路相当庞大,如供应千家万户电能的电力系统,长达数百公里;有的电路体积很小,如密集在几平方毫米内的集成电路。然而不论是什么样的电路,其组成部分必须具有电源、负载和中间环节。

电源是供应能量的装置,如电池、发电机、整流器,还有各种信号源,它们可以将非电能转换为电能,也可以把一种形式的电能转换为另一种形式的电能。负载是取用电能的装置,如电灯、电动机、电感、电容等,它们将电能转换为其他形式的能量。中间环节是传送、分配、控制电能的部分,中间环节可以就是几根导线、开关和熔断器等,也可以是比较复杂的网络或系统。

1.1.2 电路模型

在电路理论中,实际的电气设备或器件称为实际电路器件,一个实际电路器件通电后所表现出的电磁性能和能量转换过程往往比较复杂。如一个电感线圈通电后,电流周围有磁场,线匝间有电场,导线内也有电场和磁场,导线又有电阻。因此,直接分析由实际器件组成的电路比较困难,通常采用模型化的方法,把实际电路器件抽象为所谓的理想电路器件。它只显示一种主要的电磁现象或物理现象,这就引出了电路模型,就是将实际电路中的各种元件按其主要物理性质分别用一些理想电路元件来表示时所构成的电路图。所谓理想电路元件,是只反映某一种能量转换过程的元件,其他转换过程都可以忽略掉。照此逻辑,凡是能把电能转换为热能的元件就抽象成一个电阻元件,用 R 来表示;凡是能把电能转换为磁场能的元件就抽象成一个电感元件,用 L 表示;凡是能把电能转换为电场能的元件就抽象成电容元件,用 C 表示;凡是能把其他形式的

能量转换成电能的元件都抽象成电源,电源又有电压源和电流源两种。图 1-1 是它们的电路模型及图形符号。 R 、 L 、 C 是无源电路元件,电压源和电流源是有源电路元件。这 5 种是电路的基本模型。



图 1-1 电路基本模型的图形符号

如图 1-2a 是荧光灯的实际电路,它可以把电能转换为光能。如果要抽象出它的电路模型,可以作如下考虑:灯管通电后,发生电能向热能和光能转换的过程,可以用电阻 R 作为电路模型;镇

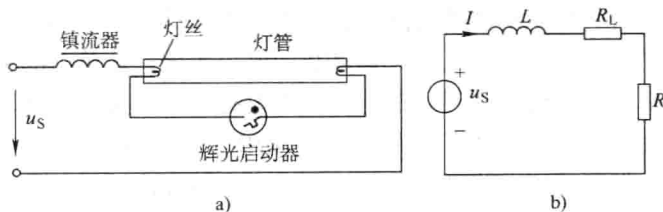


图 1-2 荧光灯接线图及其电路模型

流器接入电路时将发生电能向磁场能和热能转换两种过程，所以可以用一个电感 L 和电阻 R_L 的串联组合作为它的电路模型；外加电源如果忽略内阻，电路模型就是一个电压源。画出荧光灯的电路模型如图 1-2b 所示。今后分析电路，不是分析图 1-2a 这样的实际电路，而是分析它的电路模型，找出分析计算电路的一般性规律和方法。

1.1.3 网络与系统

在电工领域内，电路与网络并无明确区别，但习惯上常将比较复杂的电路称为网络。若网络内各元件都是无源元件，则该网络称为无源网络，习惯用 N_0 表示；含有源元件的网络则为有源网络，习惯用 N 表示。一个网络还可以和其他网络或元件连接成更大的网络，网络的连接端称为端钮。根据网络端钮的个数，网络可以分为二端网络、三端网络、四端网络等，图 1-3a、b 分别为二端网络、四端网络的框图。如果对于所有时间 t ，从一个端钮流入的电流等于从另一端钮流出的电流，那么这两个端钮构成一个端口，如图 a 中 1-1' 为一对端口，图 b 中 1-1' 也为一对端口，2-2' 为另一对端口。图 a 为一端口网络，图 b 为二端口网络或双口网络。

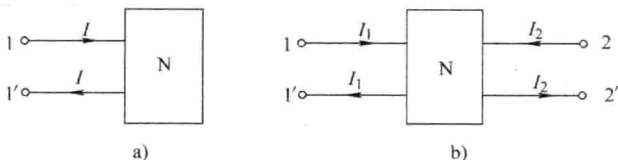


图 1-3 网络框图

用现代电路理论来分析电路时，常常把具有一定功能的电路视为一个系统。从一般意义上讲，系统是由若干互相关联的单元或设备所组成，并用来达到某种目的的有机整体。系统繁简不一，例如由发电、输电、配电、用电等多种设备组成的电网可视为一个系统，是大系统。图 1-4 是利用电桥平衡原理测量温度的原理图。其中 R_1 、 R_2 为电桥的比例臂， R_3 为可变电阻， R_t 为热敏电阻，其阻值与温度有着一定的函数关系， P 为电流计，用以检查它所在的支路有无电流。当在某一温度下把电桥调平衡后，如果温度发生了变化，则 R_t 的变化使电桥失去平衡，电流计有电流通过。这个电流的极性和大小与温度有一定的函数关系，可反映出温度的升降数值。该电路可视为一个小小的系统，即温度检测系统，也可称为信号变换系统，因为它能把温度的变化转换成相应的电信号。

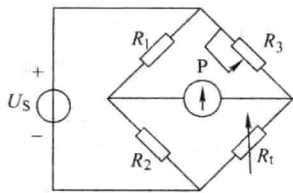


图 1-4 电桥检测温度系统

对一个电系统而言，电源的作用称为激励，激励引起的结果（如某个元件上的电流、电压）称之为响应。激励和响应的关系就是作用和结果的关系，往往对应着输入与输出的关系。

一个系统可用图 1-5 所示的框图来抽象地描述，其中 $e(t)$ 为激励， $r(t)$ 为响应。分析一个电路或系统，就是确定它的激励与响应的关系。

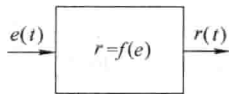


图 1-5 系统的框图表示

1.2 电流、电压及其参考方向

1.2.1 变量与参数的概念和符号规定

电路理论中涉及的物理量主要有电流、电压、电荷和磁通，电功率和能量也是重要的物

理量, 与能量直接关联的物理量称为电路分析中的变量, 如电流、电压、功率等。电路参数是影响响应的结构性因素, 如前述的 R 、 L 、 C 等。电路中所发生的一切现象是通过数学式子描述的, 这些数学式子统称为数学模型。描述电路性态的数学模型是由电路参数和变量组成的代数方程或微分方程, 如在电阻上有 $u = Ri$, 在电感上有 $u = Ldi/dt$ 。参数在线性定常电路中是常数, 规定用大写斜体字母书写, 比如, $R = 1\Omega$ 、 $L = 2H$ 、 $C = 3F$ 等。而变量的符号应采用国标规定的符号, 即直流量用大写的斜体字母表示, 而小写的斜体字母既可以表示时变量也可以是广义意义上的变量。变量单位的符号应采用国际符号, 不能用中文符号。常见变量单位符号见表 1-1。

表 1-1 常见变量单位符号

名称	电流	电压	功率	电能	电荷	电阻	电导
单位	A	V	W	J	C	Ω	S
名称	电感	电容	周期	频率	磁通	磁感应强度	磁场强度
单位	H	F	s	Hz	Wb	T	$A \cdot m^{-1}$

1.2.2 电流、电压、电位

电路中能量的转换、传送、分配以及控制是反映在电流、电压及电动势上面的, 所以, 在分析电路前要先弄清它们的概念。

1. 电流 电荷的定向运动形成电流。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。物理中规定电流是在电场的作用下单位时间内通过某一导体截面的电量。设在极短的时间 dt 内通过某一导体截面的微小电量为 dq , 则电流强度定义为 $i = dq/dt$, 表示电流强度是随时间变化的, 是时间的函数。在国际单位制 (SI) 中, 电荷 q 的单位为库 (C), 时间 t 的单位为秒 (s), 则电流 i 的单位为安 (培) (A)。

如果电流不随时间变化, 即 $dq/dt = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流, 也称为直流电流。定义为 $I = Q/T$, 式中 Q 是在时间 T 内通过导体截面积 S 的电量。

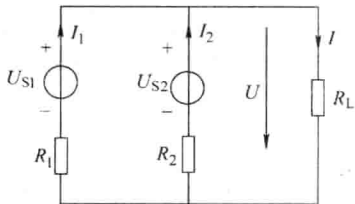
2. 电压与电动势 电荷在电场中会受到力的作用, 电压是描述电场力移动电荷时做功的物理量。电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功, 称为该两点间的电压, 记为 u_{ab} , 设电量为 dq 的电荷由 a 点移动到 b 点时电场力做的功为 dW , 则 $u_{ab} = dW/dq$, 下标 ab 表示电压方向为由 a 指向 b 。在国际单位制 (SI) 中, 能量 W 的单位为焦 (J), 电荷 q 的单位为库 (C), 则电压 u 的单位为伏 (V)。电压一般是时间 t 的函数, 应以小写字母 u 表示, 称为瞬时电压。当电压为恒定值时称为直流电压, 用大写字母 U 表示。在电场内两点间的电压也常称为两点间的电位差, 即 $U_{ab} = V_a - V_b$ 。

电源力把单位正电荷从电源的低电位端经电源内部移到高电位端所做的功, 称为电源的电动势 E 。电压和电动势都是标量, 但在分析电路时, 和电流一样, 也说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位端指向低电位端, 即为电位降低的方向, 电动势的方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端, 即为电位升高的方向。

1.2.3 电流、电压的参考方向

在分析电路时常用数学式表达各物理量间的关系, 因此需要知道电路中电流与电压的方向。过去涉及的电路非常简单, 其中电流怎么流, 电位哪里高都可以一目了然地判断出来。然

而当电路复杂化后,往往不能预先确定某段电路上电流、电压的实际方向。如图 1-6 的电路,两个电源并联给负载供电。在 $U_{S1} \neq U_{S2}$ 或 $R_1 \neq R_2$ 的情况下是否可以肯定 I_1 、 I_2 都是由电源正极流出的呢? 不作具体的分析计算是不能给出确切答案的。为了能够解决问题,可以事先假设一个方向作为分析电路的参考,这些假设的电流、电压的方向称为“参考方向”。在图 1-6 电路中所标注的电流 I_1 、 I_2 、 I 及电压 U 的方向就是假设的参考方向。即电流、电压的“参考方向”是人为假设的方向,与实际方向不一定吻合。当按参考方向来分析、计算电路时,得出的电流、电压值可能为正,也可能为负。正值表示所设的参考方向与实际方向一致,负值则表示二者方向相反。参考方向的假设完全可以是任意的。

图 1-6 U 、 I 的参考方向

在交流电路中,参考方向的问题同样重要。虽然电流的流向在周期性地变化,但只有规定了电流怎么流为正时才能进行计算。

一段电路上电流电压的参考方向标注有如图 1-7 所示方法,图 a 为电流标注法,用箭头标注在线上或在元件旁另标箭头;图 b 为电压标注法,用箭头标在元件旁边,也可以用“+ -”号标示。参考方向也可以用在符号上加注脚的方法表示,如图 1-7 中的电流 I 也可表示为 I_{cd} ,电压 U 也可表示为 U_{cd} 等。需要注意的是 $I_{cd} = -I_{dc}$, $U_{cd} = -U_{dc}$ 。

分析电路前应首先标出电流电压的参考方向,参考方向一经选定在计算中不得再作更改。

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时,称它们为关联的参考方向,如图 1-8a 所示。此时在电阻 R 上电压与电流的关系为 $U = RI$,图 1-8b 所示为非关联参考方向,此时有 $U = -RI$ 。一般情况下,分析电路时,在一个元件上标注参考方向可以只标出电流或电压一个变量,未标出的量默认为取关联参考方向。

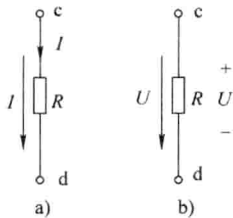


图 1-7 参考方向的表示法

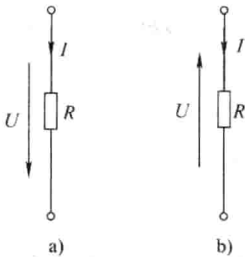


图 1-8 参考方向的关联性

思考题

- 为什么要引入电流、电压的参考方向? 参考方向与实际方向有何区别和联系?
- 在图 1-6 的电路中,设 $U_{S1} = 12\text{V}$, $U_{S2} = 11\text{V}$, $R_1 = R_2 = 1\Omega$,如果把负载电阻 R_L 断开,分别计算电流 $I_1 = (\quad)\text{A}$, $I_2 = (\quad)\text{A}$ 。

1.3 电路的功与功率计算

1.3.1 电路的功与功率

电路接通后同时进行着电能和非电能的转换,所以除了分析与计算电路中的电压和电流

外,还常常需要分析与计算功率和电能。

负载消耗或吸收的电能即电场力移动电荷 q 所做的功。由电压电流定义,可表示为

$$W = \int_0^q u dq = \int_0^{\tau} u i dt \quad (1-1)$$

式中, τ 为电流通过负载的时间。

功率是能量转换的速率,用字母 p 表示:

$$p = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u i dt = u i \quad (1-2)$$

如果电压电流都是恒定值,以上两式分别为 $W = UI\tau$ 和 $P = W/\tau = UI$ 。

当电流单位为 A,电压单位为 V 时,能量的单位为 J (焦耳,简称焦),功率的单位为 W (瓦特,简称瓦), $1\text{J} = 1\text{W} \times 1\text{s} = 1\text{W} \cdot \text{s}$ 。工程上常用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 作为电能的单位。 $1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$ 。

1.3.2 功率的计算

物理学中遇到的电路,其结构比较简单,总是认为电源发出能量,电阻吸收能量,在计算方法上没有考虑过多的问题。而在电路中需知有一些元件,既能释放能量也能吸收能量。所以确定能量的吸收与发出也是电路分析的一大问题。物理学中有如下规定:当正电荷从元件上电压的“+”极经元件移动到电压的“-”极,与此电压相应的电场力要对电荷做功,这时,元件吸收能量,反之,正电荷从电压的“-”极经元件移动到电压的“+”极时,与此电压相应的电场力做负功,元件向外释放能量。实际上能量的吸收与发出即对应着功率的吸收与发出,在电路中有更直接简单的办法来确定功率的吸收或发出。

计算功率时根据电流、电压参考方向的不同规定了以下两种情况:

关联参考方向:

$$p = ui \quad (1-3)$$

非关联参考方向:

$$p = -ui \quad (1-4)$$

在此规定下,把电流和电压的正负号如实代入公式,那么功率的性质是吸收还是发出就只看计算结果。如果为 $p > 0$ 时,则元件吸收功率,是耗能的,在电路中的作用为负载;反之,当 $p < 0$ 时,则表示元件发出功率,消耗的电能为负,说明元件产生电能,在电路中的作用为电源。这一结论可以推广到任意一个不同性质的元件上或二端网络。现以图 1-9 所示的蓄电池充电电路为例进行说明。

【例 1-1】 已知蓄电池充电电路如图 1-9 所示。其中 U_s 为用来充电的电压源,已知 $U_s = 15\text{V}$,蓄电池组电压 $U_2 = 12\text{V}$ 。电阻 R 可以控制充电电流的大小,设电阻 $R = 3\Omega$,试求:

(1) 充电电流和各元件的功率;(2) 由于某种原因使充电电源电压下降到 10V ,再计算各元件功率。

解: (1) 首先选定电流参考方向并标在图中,电路中的

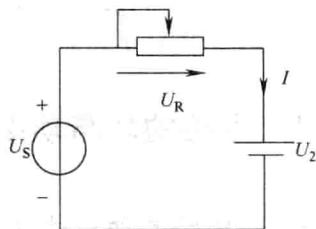


图 1-9 例 1-1 图

$$I = \frac{U_S - U_2}{R} = \frac{15 - 12}{3} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

电流为正值,说明参考方向与实际方向一致。

根据功率计算式的规定,即式(1-3)和式(1-4)可得电源功率

$$P_S = -U_S I = -15 \times 1 \text{ W} = -15 \text{ W} \quad (P < 0 \text{ 发出})$$

蓄电池功率

$$P_2 = U_2 I = 12 \times 1 \text{ W} = 12 \text{ W} \quad (P > 0 \text{ 吸收})$$

电阻功率

$$P_R = U_R I = (U_S - U_2) I = (15 - 12) \times 1 \text{ W} = 3 \text{ W} \quad (P > 0 \text{ 吸收})$$

或者

$$P_R = RI^2 = 3 \times 1^2 \text{ W} = 3 \text{ W}$$

计算结果表明,电压源发出功率,蓄电池和电阻吸收功率。整个电路电源发出的功率和等于各负载吸收的功率和,即电路中各元件上功率的代数和等于零,功率平衡关系为

$$\sum P = (-15 + 12 + 3) \text{ W} = 0 \text{ W}$$

按照能量守恒定律,上述结论对所有电路均成立,记为

$$\sum P = 0$$

该式称为功率平衡方程式。

(2) 当电源下降到 10V 时

$$I = \frac{U_S - U_2}{R} = \frac{10 - 12}{3} \text{ A} = -\frac{2}{3} \text{ A}$$

此时电流为负值,说明电流参考方向与实际方向相反,蓄电池处于放电状态。电源功率

$$P_S = -U_S I = -10 \times \left(-\frac{2}{3}\right) \text{ W} = \frac{20}{3} \text{ W} \quad (P > 0 \text{ 吸收})$$

蓄电池功率

$$P_2 = U_2 I = 12 \times \left(-\frac{2}{3}\right) \text{ W} = -8 \text{ W} \quad (P < 0 \text{ 发出})$$

电阻上的功率为

$$P_R = U_R I = (U_S - U_2) I = (10 - 12) \times \left(-\frac{2}{3}\right) \text{ W} = \frac{4}{3} \text{ W} \quad (P > 0 \text{ 吸收})$$

计算过程表明,功率计算的要点是在计算功率之前,并不认定它是吸收还是发出。只按电流、电压的参考方向代入功率计算式,再按计算值的正负号来判断功率是吸收还是发出。

【例 1-2】 在图 1-10 所示的电路中,每个框都是一个抽象的二端元件或是一个二端网络。已知 $U_1 = 5 \text{ V}$, $U_2 = 10 \text{ V}$, $I_1 = 3 \text{ A}$, $I_2 = 4 \text{ A}$, $U_3 = -5 \text{ V}$, $I_3 = 1 \text{ A}$,求各二端元件的功率,判断各元件在电路中的作用是电源还是负载?

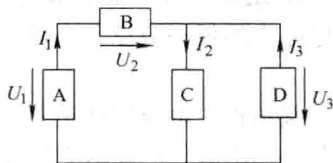


图 1-10 例 1-2 图

解: 按功率计算式(1-3)、式(1-4)求功率。

元件 A 功率: $P_1 = -U_1 I_1 = -5 \times 3 \text{ W} = -15 \text{ W}$ ($P < 0$ 发出功率,是电源)

元件 B 功率: $P_2 = U_2 I_1 = 10 \times 3 \text{ W} = 30 \text{ W}$ ($P > 0$ 吸收功率,是负载)

元件 C 功率: $P_3 = U_3 I_2 = (-5) \times 4 \text{ W} = -20 \text{ W}$ ($P < 0$ 发出功率, 是电源)

元件 D 功率: $P_4 = -U_3 I_3 = -(-5) \times 1 \text{ W} = 5 \text{ W}$ ($P > 0$ 吸收功率, 是负载)

功率计算结果满足功率平衡关系

$$\Sigma P = (-15 + 30 - 20 + 5) \text{ W} = 0 \text{ W}$$

思考题

1. 在 4s 内供给 2Ω 电阻的能量为 800J, 则该电阻两端的电压为_____。
2. 按指定的电流电压参考方向及其给定值, 计算图 1-11 各元件的功率, 并说明元件是吸收功率还是发出功率。

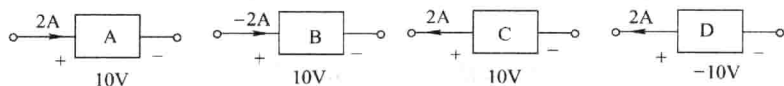


图 1-11 思考题 2 图

1.4 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是德国物理学家基尔霍夫在 1847 年发表的一篇划时代电路理论论文中提出来的, 它是进行电路分析的基本定律, 基尔霍夫定律又分为基尔霍夫电流定律和电压定律。学习定律之前先介绍电路中常用的名词术语。

1.4.1 电路基本术语的介绍

电路中流过同一电流的一段路径称为支路, 一条支路可能是一个元件或几个元件的串联组合, 中间没有其他的分支。3 条或 3 条以上支路的连接点称为节点。回路是指由一条或多条支路构成的闭合路径。内部不含其他支路的回路称为网孔, 网孔只在平面电路中涉及到。如图 1-12 的电路中 abcda 是一个回路, 但不是网孔, 在它内部有一条支路 bd。所以图 1-12 的电路中共有 6 条支路, 4 个节点 (e 点不是节点), 7 个回路, 3 个网孔。

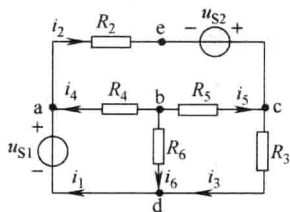


图 1-12 支路、节点和回路

1.4.2 基尔霍夫电流定律

1. 定律内容 基尔霍夫电流定律又称为基尔霍夫第一定律 (简称为 KCL)。可表述为: 对电路中的任一节点, 在任一时刻流入节点电流的总和等于流出节点电流的总和, 记为

$$\Sigma i_i = \Sigma i_o \quad (1-5)$$

基尔霍夫电流定律是对节点电流所加的约束关系, 与元件的性质无关。式中 i_i 表示流入节点的电流, i_o 表示流出节点的电流。如果取流入为正, 流出为负, 则式 (1-5) 也可以写为

$$\Sigma i = 0 \quad (1-6)$$

即流入流出节点电流的代数和为零。例如在图 1-12 中对节点 a 可列出 $i_1 + i_4 = i_2$ 或 $i_1 - i_2 + i_4 = 0$ 两种式子, 把它们称为基尔霍夫电流方程, 也叫节点方程。方程中的正负号是根据电流的参考方向确定的, 不管实际方向如何。

2. 基尔霍夫电流定律推广到闭合面 基尔霍夫电流定律不仅适用于电路的节点, 还可以推广应用到电路中任意假设的闭合面。仍以图 1-12 为例, 先对节点列方程如下:

$$\text{节点 a:} \quad i_1 - i_2 + i_4 = 0$$

$$\text{节点 b:} \quad -i_4 - i_5 - i_6 = 0$$

$$\text{节点 c:} \quad i_2 - i_3 + i_5 = 0$$

$$\text{将以上 3 式相加得到: } i_1 - i_3 - i_6 = 0$$

如果把图 1-12 作一闭合面如图 1-13, 会发现 i_1 、 i_3 、 i_6 是出入该闭合面的电流, 由上面推导又知这 3 个电流满足 KCL, 所以可以说 KCL 也适用于电路中任意假设的闭合面, 一个闭合面可以看做一个广义节点。

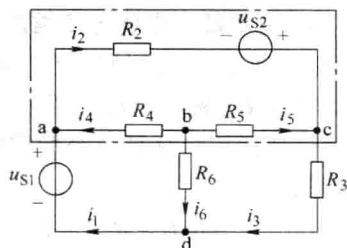


图 1-13 KCL 适用于闭合面

1.4.3 基尔霍夫电压定律

1. 定律内容 基尔霍夫电压定律又称为基尔霍夫第二定律 (简称为 KVL)。可表述为: 在任一瞬时, 沿任一回路绕行一周, 回路中各部分电压降的代数和等于零, 即

$$\sum u = 0 \quad (1-7)$$

基尔霍夫电压定律是对回路中各支路电压所加的约束关系。按基尔霍夫电压定律列出的方程叫做基尔霍夫电压方程, 也叫回路方程。

基尔霍夫电压定律是能量守恒定律在电路中的具体体现。因为能量不能创造也不能消灭, 所以单位正电荷在回路中绕行一周又回到原点时, 电场力做功的代数和为 0, 也就是电压的代数和为 0。也可以理解为电位的参考点选定后, 在同一瞬时, 某点的电位只能是单值的, 从某点出发, 绕一周又回到该点, 路途中电位有升有降, 但升降的代数和应为 0。如在图 1-13 的电路中, 当沿回路 a、b、c、d、a 顺时针绕行一周, 则有

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} + u_{da} = 0$$

如果把各支路压降具体表示出来则有

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 + R_3 i_3 - u_{S1} = 0$$

由上式可归纳列 KVL 方程时该注意的各部分电压的符号问题。按照绕行方向沿着回路绕行, 电压方向凡是与绕行方向一致的取正, 相反的取负, 其中电压方向以参考方向为准。或者说绕行途中遇到电位降落的为正, 电位升高的为负。绕行方向是任取的。就图 1-13 来说, 虽然没有标出各电阻电压的参考方向, 但电流参考方向已有, 默取电压和电流为关联参考方向。

如果把电阻压降的代数和放在左边, 而把电源放在右边, 于是整理得

$$-R_4 i_4 + R_5 i_5 + R_3 i_3 = u_{S1}$$

写成一般形式记为

$$\sum Ri = \sum u_s \quad (1-8)$$

其含义是沿回路所有电阻上电压降的代数和等于该回路所有源电压的代数和。下面再用基尔霍夫电压定律对图 1-13 电路的 3 个网孔列 KVL 方程, 都取顺时针的绕行方向

$$\text{对 achda 网孔:} \quad R_2 i_2 + R_4 i_4 - R_5 i_5 = u_{S2}$$

$$\text{对 abda 网孔:} \quad -R_4 i_4 + R_6 i_6 = u_{S1}$$