



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
电子电气基础课程规划教材

电工电子技术

(第4版)

■ 徐淑华 主编



中国工信出版集团

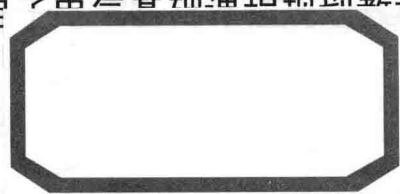


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子与电气基础课程规划教材



电工电子技术

(第4版)

徐淑华 主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,根据教育部电气电子学科基础课程教学指导委员会拟定的(电工学)最新教学基本要求编写。全书分5个模块共18章,包括电路分析基础、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、EDA技术、电机与电气控制技术,涵盖了电工电子技术的所有内容。

该书内容处理详略得当,基本概念讲述清楚,分析方法讲解透彻,思考题、例题、练习题配置齐全,难易度适中,还在部分重点、难点位置插入了动画或视频,扫描相应的二维码即可观看,方便学生自学和教师施教。

本书有配套的电工电子技术实验教程和电工电子技术学习指导与习题解答,还提供配套的电子课件。

本书可作为高等学校非电类专业学生的教科书,也可供其他工科专业选用和社会读者阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术/徐淑华主编. —4版. —北京:电子工业出版社,2017.8

ISBN 978-7-121-32032-3

I. ①电… II. ①徐… III. ①电工技术—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第144051号

策划编辑:冉 哲

责任编辑:冉 哲 特约编辑:杨永毅

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:27 字数:726千字

版 次:2003年7月第1版

2017年8月第4版

印 次:2017年8月第1次印刷

定 价:55.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: ran@phei.com.cn。

前 言

电工电子技术（电工学）课程是高等院校非电专业一门重要的专业基础课程，担负着使学生获得电路、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能的任务。该课程面对专业多，学生数量大，课程内容涉及电工电子学科各个领域，并有很强的实践性。

伴随着电工电子学科新器件、新技术、新应用的日新月异，教育教学信息化、网络化手段的飞速发展，教学内容和教材结构必须不断改革。所以，本教材进行了第四次修订，以期不断提高，日臻完善，适应越来越深入的教学改革，适应时代的需要。

本次修订仍保持了模块化的整体结构。全书内容分为 5 个模块：第 1 模块为电路分析基础；第 2 模块为模拟电子技术基础；第 3 模块为数字电子技术基础；第 4 模块为 EDA 技术；第 5 模块为电机与电气控制技术。各模块间既相互独立又相互联系，内容环环相扣，层层深入，教师可以根据专业层次和课程学时的不同而选择不同的模块，也可重组模块。每个模块的内容又分为基本内容和加深加宽（*）内容，使之适用于不同的课程层次。

本次修订以最新的“电工学课程教学基本要求”为依据，在第 3 版的基础上对部分内容精简、改写和补充。进一步突出“基础性”：突出基本概念、基本理论、基本原理和基本分析方法，尽量减少过于复杂的分析与计算，着重于定性分析；加强“实践性”：注意各部分知识的综合，加强系统的概念，每一部分内容都有由易到难、由简单到复杂的应用实例作为例题、思考题、习题及扩充内容，每一部分结束时都安排一个综合应用的实例介绍。特别是与主教材配套的实验教材，分基础验证、综合设计、创新研究三个层次设置的实验内容非常丰富；体现“先进性”：尽可能吸收课程相关的新成果、新技术，将成熟的新技术纳入教材。

本次修订在部分重点难点位置，增加了形象的动画或视频，读者可通过扫描相应的二维码观看。

与本教材配套的立体化教材有：电工电子技术电子课件，电工电子技术实验教程，电工电子技术学习指导与习题解答。请登录华信教育资源网 www.hxedu.com.cn，注册后免费下载本书电子课件。

本教材文字力求简明、概念清晰、条理清楚、讲解到位、插图规范，使之易教易学。各章开始有学习目标，结束有本章要点与其呼应，每节均配有适量的思考题与习题，供学生课后复习巩固。

本书的编写是在青岛大学电工电子实验教学中心的大力支持下进行的。其中，电路分析基础模块由马艳编写，模拟电子技术基础模块由杨艳编写，数字电子技术基础模块由王贞编写；EDA 技术模块由刘丹、陈大庆编写；电机与电气控制技术模块由赵岩岭、刘华波、刘丹编写；刘丹、宫淑贞、于双河（大连海事大学）制作了书中插入的全部动画视频。全书由徐淑华统稿。

在编写过程中，作者们学习和借鉴了大量有关的参考资料，吸取了国内外同类教材和有关文献的精华，在此向所有作者们表示深深的感谢。

由于作者水平所限，错误和不当之处在所难免，恳请各位读者批评指正，以帮助本书改进和完善。

作者

目 录

第 1 模块 电路分析基础

第 1 章 电路的基本定律与分析方法 … (1)

1.1 电路的基本概念 … (1)

1.1.1 电路的组成及作用 … (1)

1.1.2 电流和电压的参考方向 … (2)

1.1.3 能量与功率 … (3)

1.1.4 电源的工作状态 … (4)

1.1.5 理想电路元件 … (6)

1.1.6 电路模型 … (11)

1.2 电路的基本定律 … (12)

1.2.1 欧姆定律 … (12)

1.2.2 基尔霍夫定律 … (12)

1.3 电路的分析方法 … (15)

1.3.1 支路电流法 … (15)

1.3.2 节点电压法 … (15)

1.3.3 电源等效变换法 … (16)

1.3.4 叠加原理 … (19)

1.3.5 等效电源定理 … (21)

1.3.6 电位的计算 … (24)

1.3.7 含受控源电路的分析 … (25)

习题 1 … (30)

第 2 章 电路的暂态分析 … (34)

2.1 换路定则及初始值的确定 … (34)

2.1.1 换路定则 … (34)

2.1.2 初始电压、电流的确定 … (35)

2.2 RC 电路的暂态过程 … (36)

2.2.1 RC 电路的零输入响应 … (36)

2.2.2 RC 电路的零状态响应 … (37)

2.2.3 RC 电路的全响应 … (38)

2.3 一阶线性电路暂态分析的

三要素法 … (39)

2.4 RL 电路的暂态过程 … (42)

2.4.1 RL 电路的零输入响应 … (42)

2.4.2 RL 电路的零状态响应 … (43)

2.4.3 RL 电路的全响应 … (44)

2.5 一阶电路的脉冲响应 … (45)

2.5.1 一阶 RC 电路的脉冲响应 … (45)

2.5.2 积分电路 … (47)

2.5.3 微分电路 … (47)

习题 2 … (49)

第 3 章 交流电路 … (52)

3.1 正弦交流电的基本概念 … (52)

3.1.1 正弦量的三要素 … (52)

3.1.2 正弦量的相量表示法 … (54)

3.2 单一参数的正弦交流电路 … (56)

3.2.1 电阻元件的正弦交流电路 … (56)

3.2.2 电感元件的正弦交流电路 … (57)

3.2.3 电容元件的正弦交流电路 … (59)

3.3 简单正弦交流电路的分析 … (61)

3.3.1 基尔霍夫定律的相量形式 … (61)

3.3.2 正弦交流电路的阻抗 … (64)

3.3.3 正弦交流电路的功率 … (67)

3.4 电路的频率特性 … (72)

3.4.1 滤波电路 … (72)

3.4.2 谐振电路 … (73)

*3.5 非正弦周期信号的电路 … (76)

3.5.1 非正弦周期量的分解 … (77)

3.5.2 非正弦周期量的平均值和有效值 … (77)

3.5.3 非正弦周期量的线性电路的计算 … (77)

习题 3 … (80)

第 4 章 三相电路 … (84)

4.1 三相电源 … (84)

4.2 三相电路中负载的连接 … (86)

4.2.1 负载星形连接的三相电路 … (86)

4.2.2 负载三角形连接的三相电路 … (88)

4.3 三相电路的功率 … (90)

4.3.1 三相功率的计算 … (90)

4.3.2 三相功率的测量 … (91)

4.4 安全用电技术·····	(92)	4.4.3 静电防护和电气防火、 防爆常识·····	(94)
4.4.1 安全用电常识·····	(92)	习题 4·····	(95)
4.4.2 防触电的安全技术·····	(93)		

第 2 模块 模拟电子技术基础

第 5 章 常用半导体器件 ·····	(97)	6.2.1 放大电路的直流通路与 交流通路·····	(120)
5.1 PN 结及其单向导电性·····	(97)	6.2.2 基本放大电路的静态 分析·····	(120)
5.1.1 半导体基础知识·····	(97)	6.2.3 基本放大电路的动态 分析·····	(121)
5.1.2 PN 结的形成·····	(98)	6.3 常用基本放大电路的类型及 特点·····	(126)
5.1.3 PN 结的单向导电性·····	(98)	6.3.1 射极输出器(共集放大 电路)·····	(126)
5.2 半导体二极管·····	(99)	6.3.2 差动放大电路·····	(128)
5.2.1 二极管的基本结构·····	(99)	6.3.3 互补对称功率放大电路·····	(129)
5.2.2 二极管的伏安特性·····	(100)	6.4 实用放大电路的结构·····	(130)
5.2.3 二极管的主要参数·····	(100)	习题 6·····	(133)
5.2.4 二极管的应用举例·····	(101)	第 7 章 集成运算放大器及其应用 ·····	(136)
5.3 稳压二极管·····	(102)	7.1 集成运算放大器概述·····	(136)
5.4 半导体三极管·····	(103)	7.1.1 集成运算放大器的组成及 工作原理·····	(136)
5.4.1 三极管的基本结构·····	(103)	7.1.2 集成运算放大器的传输 特性·····	(137)
5.4.2 三极管的工作原理·····	(104)	7.1.3 集成运算放大器的主要 参数·····	(137)
5.4.3 三极管的伏安特性·····	(105)	7.1.4 理想集成运算放大器及 分析依据·····	(138)
5.4.4 三极管的主要参数·····	(106)	7.2 放大电路中的负反馈·····	(139)
*5.5 绝缘栅型场效应晶体管·····	(108)	7.2.1 反馈的概念·····	(139)
5.5.1 基本结构与工作原理·····	(108)	7.2.2 反馈的类型及判断·····	(140)
5.5.2 特性曲线·····	(109)	7.2.3 负反馈对放大电路性能的 影响·····	(142)
5.5.3 场效应管使用注意事项·····	(109)	7.3 集成运算放大器的线性应用·····	(144)
5.6 光电器件·····	(110)	7.3.1 基本运算电路·····	(145)
5.6.1 发光二极管·····	(110)	7.3.2 集成运算放大器在信号 处理方面的应用·····	(150)
5.6.2 光电二极管·····	(110)	7.3.3 RC 正弦波振荡器·····	(153)
5.6.3 光电三极管·····	(110)	7.4 集成运算放大器的非线性应用·····	(155)
5.6.4 光电耦合器·····	(111)	7.4.1 电压比较器·····	(155)
5.7 集成电路·····	(111)	*7.4.2 信号产生电路·····	(157)
习题 5·····	(113)		
第 6 章 基本放大电路 ·····	(115)		
6.1 基本放大电路的组成及工作 原理·····	(115)		
6.1.1 基本放大电路的组成·····	(115)		
6.1.2 基本放大电路的工作 原理·····	(116)		
6.1.3 基本放大电路的性能 指标·····	(117)		
6.2 基本放大电路的分析·····	(120)		

7.5 集成运算放大器使用时的注意 事项	(159)	8.2.1 电容滤波器	(172)
7.6 集成运算放大器的应用举例	(160)	8.2.2 其他形式的滤波电路	(174)
习题 7	(163)	8.3 稳压电路	(174)
第 8 章 半导体直流稳压电源	(169)	8.3.1 稳压管稳压电路	(174)
8.1 整流电路	(169)	8.3.2 串联型稳压电路	(175)
8.1.1 单相半波整流电路	(169)	8.3.3 集成稳压电路	(176)
8.1.2 单相桥式整流电路	(170)	*8.3.4 开关型稳压电路	(178)
8.2 滤波电路	(172)	习题 8	(182)

第 3 模块 数字电子技术基础

第 9 章 门电路与组合逻辑电路	(183)	第 10 章 触发器与时序逻辑电路	(223)
9.1 数字电路概述	(183)	10.1 双稳态触发器	(223)
9.1.1 脉冲信号和数字信号	(183)	10.1.1 RS 触发器	(223)
9.1.2 数字电路中常用数制	(184)	10.1.2 JK 触发器与 D 触发器	(227)
9.2 逻辑代数与逻辑函数	(187)	10.1.3 触发器逻辑功能的转换	(228)
9.2.1 逻辑代数	(187)	10.1.4 触发器应用举例	(230)
9.2.2 逻辑函数及其表示法	(191)	10.2 寄存器	(231)
9.2.3 逻辑函数的化简与变换	(192)	10.2.1 数码寄存器	(231)
9.3 集成逻辑门电路	(195)	10.2.2 移位寄存器	(232)
9.3.1 TTL 与非门电路	(195)	10.3 计数器	(234)
9.3.2 CMOS 门电路	(197)	10.3.1 异步计数器	(235)
9.3.3 三态输出与非门电路	(197)	10.3.2 同步计数器	(238)
9.3.4 集成逻辑门电路使用中的 几个实际问题	(198)	10.4 中规模集成计数器组件及其应用	(240)
9.4 组合逻辑电路的分析与设计	(200)	10.4.1 中规模集成计数器组件	(240)
9.4.1 组合逻辑电路的分析	(200)	10.4.2 用集成计数器构成任意 进制计数器	(242)
9.4.2 组合逻辑电路的设计	(201)	10.5 555 定时器及其应用	(245)
9.5 常用组合逻辑模块	(203)	10.5.1 555 定时器	(245)
9.5.1 加法器	(203)	10.5.2 用 555 定时器组成单稳态 触发器	(246)
9.5.2 编码器	(205)	10.5.3 用 555 定时器组成多谐 振荡器	(249)
9.5.3 译码器	(207)	10.5.4 用 555 定时器组成施密特 触发器	(251)
9.5.4 数据分配器与数据 选择器	(211)	10.6 时序逻辑电路的应用	(254)
9.5.5 数值比较器	(212)	10.7 数字电路的故障诊断与排除	(255)
9.5.6 用中规模组合逻辑模块 实现组合逻辑函数	(213)	10.7.1 常见故障错误的检测和 排除	(255)
9.6 应用举例	(215)	10.7.2 信号追踪和波形分析	(256)
9.6.1 交通信号灯故障检测 电路	(215)	习题 10	(260)
9.6.2 全减器电路	(216)		
习题 9	(221)		

第 11 章 半导体存储器 ·····	(265)
11.1 只读存储器 (ROM) ·····	(265)
11.1.1 ROM 的基本结构和工作原理 ·····	(265)
11.1.2 ROM 的分类·····	(267)
11.1.3 ROM 的应用·····	(268)
11.2 随机存取存储器 (RAM) ·····	(271)
11.2.1 RAM 的基本结构和工作原理 ·····	(271)
11.2.2 RAM 存储容量的扩展·····	(272)
11.3 闪存 ·····	(274)
11.3.1 闪存存储单元的基本结构 ·····	(274)
11.3.2 闪存的基本操作 ·····	(275)
11.3.3 基本闪存阵列 ·····	(276)
11.4 数字系统应用举例 ·····	(276)

11.4.1 自动药片包装线控制系统·····	(276)
11.4.2 楼宇安全进入系统·····	(279)
习题 11·····	(281)
第 12 章 模拟量和数字量的转换 ·····	(283)
12.1 D/A 转换器 ·····	(283)
12.1.1 D/A 转换器的组成和工作原理 ·····	(283)
12.1.2 D/A 转换器的主要技术指标 ·····	(285)
12.2 A/D 转换器 ·····	(286)
12.2.1 逐次逼近型 A/D 转换器的组成和工作原理·····	(286)
12.2.2 A/D 转换器的主要技术指标 ·····	(289)
习题 12·····	(290)

第 4 模块 EDA 技术

第 13 章 电子电路的仿真和可编程逻辑器件 ·····	(291)
13.1 电子电路的仿真 ·····	(292)
13.1.1 Multisim (EWB) 简介 ·····	(292)
13.1.2 Multisim 10 的应用·····	(299)

13.2 可编程逻辑器件 ·····	(304)
13.2.1 可编程逻辑器件·····	(304)
13.2.2 可编程模拟器件·····	(317)
习题 13·····	(323)

第 5 模块 电机与电气控制技术

第 14 章 铁心线圈与变压器 ·····	(325)
14.1 磁路的基本概念 ·····	(325)
14.1.1 磁场的基本物理量 ·····	(325)
14.1.2 铁磁性材料的磁性能 ·····	(326)
14.1.3 磁路的欧姆定律 ·····	(327)
14.2 铁心线圈电路 ·····	(328)
14.2.1 直流铁心线圈电路 ·····	(328)
14.2.2 交流铁心线圈电路 ·····	(328)
14.3 电磁铁 ·····	(330)
14.3.1 直流电磁铁 ·····	(330)
14.3.2 交流电磁铁 ·····	(330)
14.4 变压器 ·····	(331)
14.4.1 变压器的基本结构 ·····	(332)
14.4.2 变压器的工作原理 ·····	(332)
14.4.3 变压器的主要技术指标和额定值 ·····	(335)
14.4.4 变压器的同极性端 ·····	(335)
14.4.5 特殊变压器 ·····	(336)

习题 14·····	(338)
第 15 章 异步电动机 ·····	(340)
15.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理 ·····	(340)
15.1.1 三相异步鼠笼式电动机的基本结构·····	(340)
15.1.2 三相异步电动机的旋转磁场·····	(341)
15.1.3 三相异步电动机的转动原理·····	(343)
15.2 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性 ·····	(344)
15.2.1 三相异步电动机的电路分析·····	(344)
15.2.2 三相异步电动机的电磁转矩·····	(345)
15.2.3 三相异步电动机的机械特性·····	(346)

15.3 三相异步电动机的额定数据	(348)	17.2.4 鼠笼式电动机的正反转 控制	(381)
15.4 三相异步电动机的使用	(350)	17.2.5 多台电动机联锁控制	(382)
15.4.1 三相异步电动机的启动 ..	(350)	17.3 行程控制	(383)
15.4.2 三相异步电动机的调速 ..	(351)	17.4 时间控制	(384)
15.4.3 三相异步电动机的制动 ..	(352)	17.5 应用举例	(386)
15.5 单相异步电动机	(352)	习题 17	(387)
习题 15	(355)	第 18 章 可编程序控制器及应用	(390)
*第 16 章 直流电动机和控制电机 ..	(356)	18.1 PLC 的基本结构和工作原理	(390)
16.1 直流电动机的构造及工作原理 ..	(356)	18.1.1 PLC 的基本结构	(390)
16.1.1 直流电动机的组成	(356)	18.1.2 PLC 的工作原理	(391)
16.1.2 直流电动机的工作原理 ..	(357)	18.1.3 PLC 的主要性能指标	(392)
16.2 并励(他励)电动机的机械 特性	(358)	18.2 PLC 程序设计基础	(393)
16.2.1 机械特性	(358)	18.2.1 PLC 编程语言与程序 结构	(393)
16.2.2 电动机的稳定运行	(359)	18.2.2 存储器的数据类型与 寻址	(394)
16.3 并励(他励)电动机的使用	(360)	18.2.3 位逻辑指令	(397)
16.3.1 启动	(360)	18.2.4 定时器与计数器指令	(398)
16.3.2 制动	(361)	18.2.5 功能指令	(400)
16.3.3 调速	(361)	18.3 PLC 基本编程	(404)
16.4 控制电机	(363)	18.3.1 PLC 基本编程原则	(404)
16.4.1 伺服电动机	(363)	18.3.2 梯形图编程典型电路	(404)
16.4.2 步进电动机	(365)	18.4 PLC 应用举例	(406)
习题 16	(369)	18.4.1 PLC 应用系统设计步骤 ..	(406)
第 17 章 继电接触器控制系统	(371)	18.4.2 三层电梯 PLC 控制设计 ..	(407)
17.1 常用低压控制电器	(371)	习题 18	(411)
17.1.1 手动电器	(371)	附录 A 电阻器和电容器的命名方法及 性能参数	(413)
17.1.2 自动电器	(373)	附录 B 半导体分立器件命名方法及 性能参数	(416)
17.2 三相异步鼠笼式电动机的基本 控制	(378)	附录 C 半导体集成电路型号命名 方法及性能参数	(419)
17.2.1 鼠笼式电动机的直接启 停控制	(379)	参考文献	(422)
17.2.2 鼠笼式电动机的点动 控制	(380)		
17.2.3 鼠笼式电动机的异地 控制	(381)		

第1模块 电路分析基础

第1章 电路的基本定律与分析方法

引言

电路理论主要研究电路中发生的电磁现象。用电流、电压和电功率等物理量来描述其中的过程。本章首先介绍了电路及其相关的基本概念，电压、电流的参考方向及应用，电源的工作状态，以及在电路中经常使用的各种理想电路元件。

因为电路是由电路元件构成的，因而整个电路所体现的特性既要看元件的连接方式，又要看每个元件的特性，这就决定了电路中各支路电流、电压都要受到两种基本规律的约束，即：（1）电路元件性质的约束。也称为电路元件的伏安关系，如欧姆定律，它仅与元件性质有关，而与元件在电路中的连接方式无关。（2）电路连接方式的约束，这种约束关系与电路元件的性质无关，基尔霍夫定律是概括这种约束关系的基本定律。

虽然使用欧姆定律和基尔霍夫定律可以计算和分析电路，但当遇到复杂的电路分析时，往往要根据电路的结构特点去寻找分析与计算的简便方法，本章以直流电路为例讨论了几种常用的电路分析方法，其中有：支路电流法、节点电压法、电源的等效变换、叠加原理和等效电源定理。这些方法不仅适用于直流电路的分析，也适用于交流电路。

学习目标

- 理解物理量的参考方向的概念。
- 能够正确判断电路元件的电路性质，即电源和负载。
- 掌握各种理想电路元件的伏安特性。
- 掌握基尔霍夫定律。
- 能够正确使用支路电流法列写电路的方程。
- 能够使用节点电压法的标准形式列写出节点电压的方程。
- 理解等效的概念，掌握电源等效变换的分析方法。
- 能够正确应用叠加原理分析和计算电路。
- 掌握等效电源定理，在电路分析中能熟练地应用该定理。
- 理解电位的概念，掌握电位的计算。
- 了解包含受控源电路的分析方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成及作用

电路是电流通过的路径，是各种电气设备或元件按一定方式连接起来组成的总体。不管是简单的还是复杂的电路，都可分为三大部分：第一，提供电能（或信号）的部分称为电源，如蓄电池、发电机和信号源等；第二，吸收或转换电能的部分称为负载，如电动机、照明灯和电炉等；第三，连接和控制这两部分的称为中间环节。最简单的中间环节可以是两根连接导线，而复杂的中间环节可以是一个庞大的控制系统。

电路的作用可分为两类：一是传输和转换电能。典型的例子是电力系统，其电路示意图如图 1.1 所示。

发电机是电源，是供应电能的设备，它将热能或原子能等转换成电能。变压器和输电线是中间

环节, 连接电源和负载, 它们起传输和分配电能的作用。用户负载包括各种取用电能的设备, 它们分别把电能转换成光能、机械能、热能等。显然, 该电路的作用是实现能量的传输和转换。



图 1.1 电力系统示意图

电路的另一作用是进行信号的传递和处理。例如电视机电路, 电视机的接收天线在接收到载有声音、图像的电磁波后, 将其转换为相应的电信号, 而后通过电路对信号进行传递和处理, 送到扬声器和显示器, 还原为声音和图像。

不论电能的传输和转换, 还是信号的传递和处理, 其中电源或信号源的电压或电流称为激励, 激励在电路的各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析, 就是在已知电路的结构和元件的参数条件下, 讨论电路中激励和响应的关系。

当电路中电流的大小和方向不随时间发生变化时, 称电路为直流电路; 当电路中电流的大小和方向随时间按正弦规律变化时, 称电路为正弦交流电路。依照国家标准, 直流量用大写字母表示, 例如: 电压、电流、电动势分别表示为: U, I, E ; 交流量用小写字母表示, 例如: 电压、电流、电动势分别表示为: u, i, e 。

1.1.2 电流和电压的参考方向

电流、电压和电动势是电路中的基本物理量, 在电路分析中, 只有在电路图中标出它们的方向, 才能正确列写电路方程式。电路中关于方向的规定有实际方向和参考方向之分。

在物理学中规定, 电流的实际方向是指正电荷运动的方向; 两点间电压的实际方向是从高电位端指向低电位端的方向; 电动势的方向是低电位端指向高电位端的方向。实际方向如图 1.2 所示。

但在复杂电路的分析中, 某一段电路的电压、电流、电动势的实际方向往往很难事先判断出来, 有时它们的方向还在不断地改变。为了分析电路, 需要引入参考方向(假定正方向)。

参考方向是任意假定的。电压、电流、电动势的正方向, 可用箭头、“+”、“-”号或给电流、电压、电动势加双下标的方法来表示, 如图 1.3 所示。

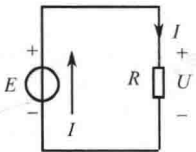


图 1.2 电路中电流、电压和电动势的方向

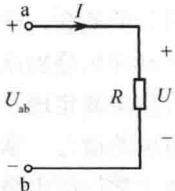


图 1.3 参考方向的表示方法

当参考方向设定以后, 可以根据参考方向列写电路方程, 求解电路中未知的电流、电压或电动势。若所得结果为正, 则说明该物理量的实际方向与参考方向相同; 若所得结果为负, 则说明该物理量的实际方向与参考方向相反。若事先没有标出参考方向, 则所得结果的正、负无任何意义! 因此, 只有在选定参考方向之后, 电压、电流、电动势的正、负才有意义。所以, 在分析电路之前, 一定要先确定参考方向。如图 1.4 所示, 电流的实际方向为虚线箭头表示的方向, 当参考方向为实线箭头表示的方向时, 图 (a) 中, $I > 0$; 图 (b) 中, $I < 0$ 。

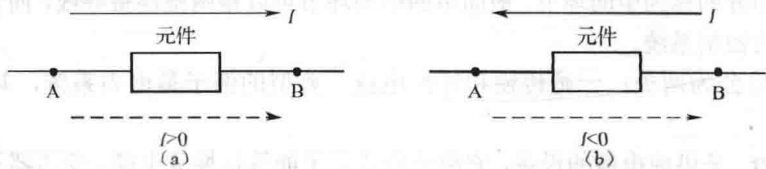


图 1.4 电流的实际方向和参考方向

若取一个元件或一段电路上的电压、电流的参考方向一致，则称为关联参考方向，如图 1.3 中电阻元件上的电压和电流。当选取关联参考方向时，只需标出一种参考方向即可。若两者不一致，则称为非关联参考方向。

在分析计算电路时，一般都采用关联参考方向。除特别说明外，本书中电路图上所标的电流、电压和电动势的方向都是参考方向。

【例 1.1】 已知 $E=2\text{V}$ ， $R=1\Omega$ ，求当 U 分别为 3V 和 1V 时， I_R 的大小和方向？

解：（1）假设物理量的参考方向如图 1.5 所示。

（2）列出电路的方程为： $U_R=U-E$

则
$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U-E}{R}$$

（3）当 $U=3\text{V}$ 时， $I_R=1\text{A}$ ；实际方向与参考方向一致。

当 $U=1\text{V}$ 时， $I_R=-1\text{A}$ ，实际方向与参考方向相反。

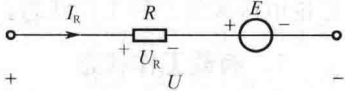


图 1.5 例 1.1 的图

1.1.3 能量与功率

电路在工作状态下总伴随着电能与其他形式能量的相互交换，根据能量守恒定律，电源提供的电能等于负载消耗或吸收的电能的总和。

从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的电能可以用电场力移动电荷所做的功来表示

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

因为 $i = \frac{dq}{dt}$ ，所以在关联参考方向下

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \tag{1.1}$$

功率是能量对时间的导数，由式（1.1）可知，元件吸收的电功率可写成

$$p = ui$$

取电压、电流为关联参考方向，当 $p>0$ 时（此时电压、电流的实际方向相同），元件要吸收功率，具有负载的电路性质；而当 $p<0$ 时（此时电压、电流的实际方向相反），元件释放电能，即发出功率，具有电源的电路性质。

在 SI 制中，能量 W 的单位为焦耳（J），功率 P 的单位为瓦特（W）。若时间用小时（h），功率用千瓦（kW）为单位，则电能的单位为“千瓦·小时”，也称为“度”，这是供电部门度量用电量的常用单位。

【例 1.2】 在图 1.6（a）所示电路中，方框代表电源或负载，电流和电压的参考方向如图所示。通过测量得知： $U_1 = 20\text{V}$ ， $U_2 = 20\text{V}$ ， $U_3 = -100\text{V}$ ， $U_4 = 120\text{V}$ ， $I_1 = -10\text{A}$ ， $I_2 = 20\text{A}$ ， $I_3 = -10\text{A}$ 。

- （1）标出各电流、电压的实际方向和极性。
- （2）判断哪几个方框是电源，哪几个方框是负载。

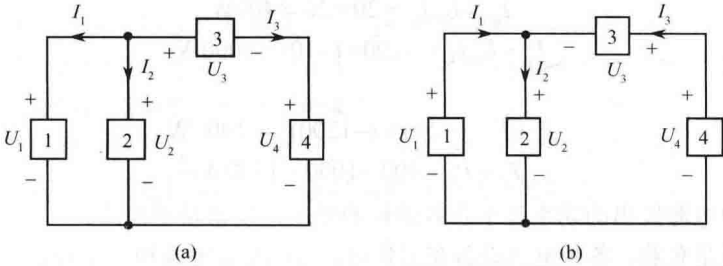


图 1.6 例 1.2 的图

解：(1) 当电流、电压的参考方向与实际方向一致时，其值为正；相反时，其值为负。得各电流、电压的实际方向如图 1.6 (b) 所示。

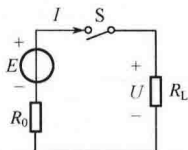
(2) 当元件上的电压、电流实际方向一致时，该元件为负载；当电压、电流实际方向相反时，为电源。可得：方框 1, 4 为电源；方框 2, 3 为负载。

1.1.4 电源的工作状态

电源在不同的工作条件下，会处于不同的状态，具有不同的特点。下面以直流电路为例，分别讨论电压源的三种工作状态。

1. 有载工作状态

电源与负载接通，电路中有电流流动，此时电源发出功率，负载消耗功率。电源的这种状态称为有载状态。如图 1.7 所示， E 为电源电动势， R_0 为电源内阻， R_L 为负载电阻。开关 S 闭合，接通电源和负载，电路中的电流为



$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1.2)$$

图 1.7 电源的有载工作

负载两端的电压，即电源端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1.3)$$

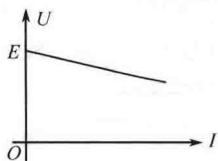


图 1.8 电源的外特性曲线

式 (1.3) 反映了电源端电压 U 和输出电流 I 的关系，称为电源的外特性，如图 1.8 所示。由此曲线可看出，由于电源内阻的存在，当负载电流增大时，电源端电压下降，因为此时内阻上的压降增加。这就是为什么在用电高峰期，会出现电压不足的原因。但通常电源内阻很小，所以正常工作时，电流变动引起的电压下降很小。

电源输出的功率为电动势与电流的乘积，电路中消耗功率为电源内阻和负载消耗功率之和（忽略连接导线产生的功率损耗），二者应平衡。电路产生的总功率等于电路消耗的总功率

$$\begin{aligned} EI &= I^2 R_0 + UI \\ UI &= EI - I^2 R_0 \\ P &= P_E - \Delta P \end{aligned} \quad (1.4)$$

即

该公式称为功率平衡方程式。

【例 1.3】验证例 1.2 中的功率是平衡的。

解：在图 1.6 (a) 中，所有元件上的 U 、 I 都为关联参考方向。

所以电源发出的功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 = 20 \times (-10) = -200 \text{ W} \\ P_4 &= U_4 I_3 = 120 \times (-10) = -1200 \text{ W} \end{aligned}$$

负载消耗的功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= U_2 I_2 = 20 \times 20 = 400 \text{ W} \\ P_3 &= U_3 I_3 = -100 \times (-10) = 1000 \text{ W} \end{aligned}$$

由上面的计算得

$$\begin{aligned} P_1 + P_4 &= -200 + (-1200) = -1400 \text{ W} \\ P_2 + P_3 &= 400 + 1000 = 1400 \text{ W} \end{aligned}$$

可见，电路中电源发出的功率等于负载消耗的功率，功率是平衡的。

不管是电源还是负载，各种电气设备在工作时，其电压、电流和功率都有一定的限额。这些限额是用来表示它们的正常工作条件和工作能力的，称为电气设备的额定值。额定值是生产厂家为了

使产品能在给定的工作条件下正常工作而规定的容许值。额定值一般在电气设备的铭牌上标出，或写在其他说明中。使用时必须考虑这些额定数据。若负载的实际电压、电流值高于额定值，则可造成负载的损坏或降低使用寿命；若负载的实际电压、电流值低于额定值，则不能正常工作，有时也会造成负载的损坏或降低使用寿命。由于外界因素的影响，允许负载的实际电压、电流值与额定值有一定的误差。例如，由于电源电压的波动，允许负载电压在 $\pm 5\%$ 的范围内变化。

对于负载来说，正常工作时，实际值与额定值非常接近，而对于电源来说，其额定电压是一定的，额定功率只代表它的容量。实际工作时，其输出电流和功率的大小取决于负载的大小，即负载需要多少功率和电流，电源就提供多少。当实际功率小于额定功率时，称电源为轻载工作；当实际功率等于额定功率时，称电源为满载工作；当实际功率大于额定功率时，称电源为超载工作，电源的超载工作是不允许的。

分析可知，当电源外接负载电阻与电源内阻相同时，负载可获得最大功率。

【例 1.4】额定值为 220V，60W 的电灯，试求其电流和灯丝电阻。若每天用 3 小时，每月（30 天）用电多少？

解：

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} \approx 0.273 \text{ A}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} \approx 806 \Omega$$

$$W = Pt = 60 \times (3 \times 30) = 5400 \text{ W} \cdot \text{h} = 5.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

【例 1.5】标称值为 1000Ω ， $\frac{1}{2} \text{ W}$ 的电阻，额定电流为多少？在使用时电压不得超过多少？

解：

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.5}{1000}} = 0.022 \text{ A}$$

使用时电压不得超过

$$U = IR = 0.022 \times 1000 = 22 \text{ V}$$

2. 开路

在图 1.7 所示的电路中，若开关 S 断开，则电源处于开路状态，如图 1.9 所示。当电源开路时，负载电阻 R_L 为无穷大，输出电流 I 为零，开路电压，即电源的空载电压 U_0 等于电源电动势 E 。即：

$$\begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_0 = E \\ P &= 0 \end{aligned} \tag{1.5}$$

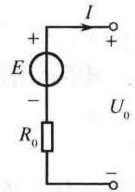


图 1.9 开路

3. 短路

当某一部分的电路两端用电阻可以忽略不计的导线连接起来，使得该部分电路中的电流全部被导线旁路，这部分电路所处的状态称为短路，如图 1.10 所示。因为电路中只有很小的电源内电阻，所以短路电流 I_s 很大。短路时电源所产生的能量全部被内阻消耗，此时超过额定电流若干倍的短路电流可以使供电系统中的设备烧毁或引起火灾。电源短路通常是一种严重的事故，应尽量预防。通常，在电路中接入熔断器等短路保护装置，以便在发生短路故障时，能迅速将电源与短路部分断开。但有时由于某种需要，可以将电路中的某一段短接，进行某种短路实验。

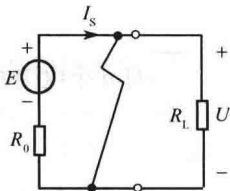


图 1.10 短路

当电源短路时，短路线上的电压为零，电动势全部降在电源内电阻上

$$U = 0$$

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (1.6)$$

电源内阻消耗的功率为

$$P_s = R_0 I_s^2$$

1.1.5 理想电路元件

电路元件是组成电路的基本单元,每种元件都反映了某种确定的电磁性质,电路元件通过其端子与外电路相连接,元件的性质通常用端口处的伏安关系描述。

电路元件按照端子数目可分为二端、三端、四端元件等,还可以分为有源元件和无源元件、线性元件和非线性元件。

1. 电阻元件

电阻是表征电路中阻碍电流流动特性的参数,电阻元件是表征电路中消耗电能理想元件,习惯上也简称为电阻,所以通常我们所说的电阻既是电路元件又是表征其量值大小的参数。电阻元件的电路符号如图 1.11 所示。

电阻元件可以分为线性电阻和非线性电阻,这里我们只讨论线性电阻。线性电阻的阻值 R 是一个常数。在线性电阻中,任一瞬间其两端的电压与通过它的电流的关系总是满足欧姆定律。即:

$$u = iR \quad (1.7)$$

根据欧姆定律,可以得出线性电阻元件的伏安特性是一条直线,如图 1.12 所示。

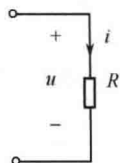


图 1.11 电阻元件的电路符号

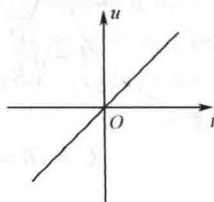


图 1.12 电阻元件的伏安特性

电阻元件是一种耗能元件,其能量转换过程是不可逆的。电阻吸收的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1.8)$$

电阻元件上的功率总为正值,从 t_0 到 t 的时间内,电阻消耗的能量为

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1.9)$$

电阻的单位是 Ω (欧姆),对于大电阻,常用 $k\Omega$ (千欧)或 $M\Omega$ (兆欧)作为单位。

当 n 个电阻串联时,可等效为一个电阻,其等效电阻 R 为

$$R = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1.10)$$

当有 n 个电阻并联时,可等效为一个电阻,其等效电阻 R 为

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1.11)$$

一般负载都是并联运用的,负载并联时,它们承受相同的电压,任一负载的工作状态基本不受其他负载的影响。

并联的负载电阻越多(负载增加),则总电阻越小,电路中总电流和总功率越大,但是每个负载的电流和功率却没有变动。

2. 电感元件

电感元件是由储存磁场能的物理过程抽象出来的理想电路元件, 即凡是磁场储能的物理过程都可以用电感元件来表示。线圈是典型的电感元件。当忽略线圈的电阻时, 可以认为它是一个理想的电感元件。电感元件的电路符号如图 1.13 (a) 所示。

当电流 i 通过线圈时, 线圈中就会有磁通 ϕ , 若线圈匝数为 N , 则磁链为 $\psi = N\phi$ 。

磁链 ψ 与电流 i 的比值称为线圈的电感

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (1.12)$$

L 是表征线圈产生磁通能力的物理量。

若 L 不随电流或者磁通的变化而变化, 则称为线性电感。例如, 空心线圈, 因为空气的磁导率是常数, L 也为常数, i 与 ϕ 的关系为线性的。本书中除特别指明之外, 讨论的均是线性电感。电感的单位是 H (亨利)。

电感反映了电能转换为磁场能, 即电流建立磁场的物理本质。磁通 ϕ 与电流 i 之间的方向符合右手螺旋法则, 如图 1.13 (b) 所示。

当线圈中的电流发生变化时, 它产生的磁通也发生变化, 根据电磁感应定律, 在线圈两端将有感应电动势产生。规定感应电动势的方向与电流的方向一致, 即 ϕ 与 e_L 的方向也符合右手螺旋法则, 则

$$e_L = -\frac{dN\phi}{dt} = -N\frac{d\phi}{dt} \quad (1.13)$$

因为 $Li = N\phi$, 所以

$$e_L = -\frac{dLi}{dt} = -L\frac{di}{dt} \quad (1.14)$$

根据图 1.13 规定的电压方向 (与电流方向一致), 则电感元件的伏安关系为

$$u = -e_L = L\frac{di}{dt} \quad (1.15)$$

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.16)$$

式中, i_0 为 $t=0$ 时电感元件中的电流, 称为电流的初始值。若 $i_0 = 0$, 则

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t u dt$$

式 (1.14) 说明电感元件两端的电压与通过它的电流的变化率成正比。只有当电流变化时, 电感元件两端才有电压。若电感元件中通过的电流是直流, 因为 $\frac{di}{dt} = 0$, 则电感元件两端的电压为零, 即电感元件对直流可视为短路。

电感元件是一种储能元件。当通过电感的电流增大时, 电感将电能变为磁场能储存在磁场中; 当通过电感的电流减小时, 电感将储存的磁场能变为电能释放给电源。因而当通过电感的电流发生变化时, 电感只进行电能与磁场能的转换, 理想电感本身不消耗能量。电感在任一时间内的储能可用下式计算

$$W_L = \int_{-\infty}^t u idt = \int_0^i Lid i = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.17)$$

因此, 电感储存的磁场能只与该时刻电流的大小有关。

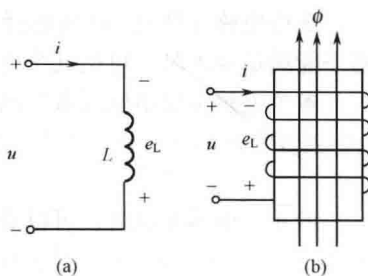


图 1.13 电感元件

选用电感元件时,既要选择合适的电感值,又不能使实际工作电流超过其额定电流。当单个电感不能满足要求时,可把几个电感串联或并联使用。

多个电感可以串联或者并联工作,当 n 个电感串联时,可以等效为一个电感,其等效电感值为

$$L = \sum_{k=1}^n L_k \quad (1.18)$$

当 n 个电感并联时,可以等效为一个电感,其等效电感值为

$$\frac{1}{L} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k} \quad (1.19)$$

【例 1.6】电感元件 $L = 0.2\text{H}$, 通过的电流 i 的波形如图 1.14 (b) 所示。求电感中产生的感应电动势 e_L 和电感两端电压 u 的波形。

解: 用分段函数表示 i

$$i = \begin{cases} t, & 0 \leq t \leq 4\text{ms} \\ -2t + 12, & 4 \leq t \leq 6\text{ms} \end{cases}$$

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = \begin{cases} -0.2\text{V}, & 0 \leq t \leq 4\text{ms} \\ +0.4\text{V}, & 4 \leq t \leq 6\text{ms} \end{cases}$$

波形如图 1.14 (c) 所示。

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \begin{cases} 0.2\text{V}, & 0 \leq t \leq 4\text{ms} \\ -0.4\text{V}, & 4 \leq t \leq 6\text{ms} \end{cases}$$

波形如图 1.14 (d) 所示。

3. 电容元件

电容元件是由电场储能的物理过程抽象出来的理想元件,凡是电场储能的物理过程都可以用电容元件来表示。一个电容器,当忽略它的电阻和电感时,可以认为它是一个理想的电容元件。电容元件的电路符号如图 1.15 所示。

在电容元件两端加上电压 u , 电容开始充电,建立电场。设极板上所带的电荷为 q , 则电容的定义为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.20)$$

C 是电容元件的参数,称为电容(量),它表征电容储存电荷的能力。当电容上的电压 u 和电荷 q 之间的关系为线性时, C 为常数,该电容为线性电容。在国际单位制中,电容的单位是 F (法拉),常用 μF (微法)或 pF (皮法)作为单位。

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

当电容元件上的电压 u 增大时,极板上的电荷 q 增加,电容充电;当电压减小时,极板上的电荷 q 减小,电容放电。根据电流的定义

$$i = \frac{dq}{dt}$$

得到电容上电压电流的关系为

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1.21)$$

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1.22)$$