



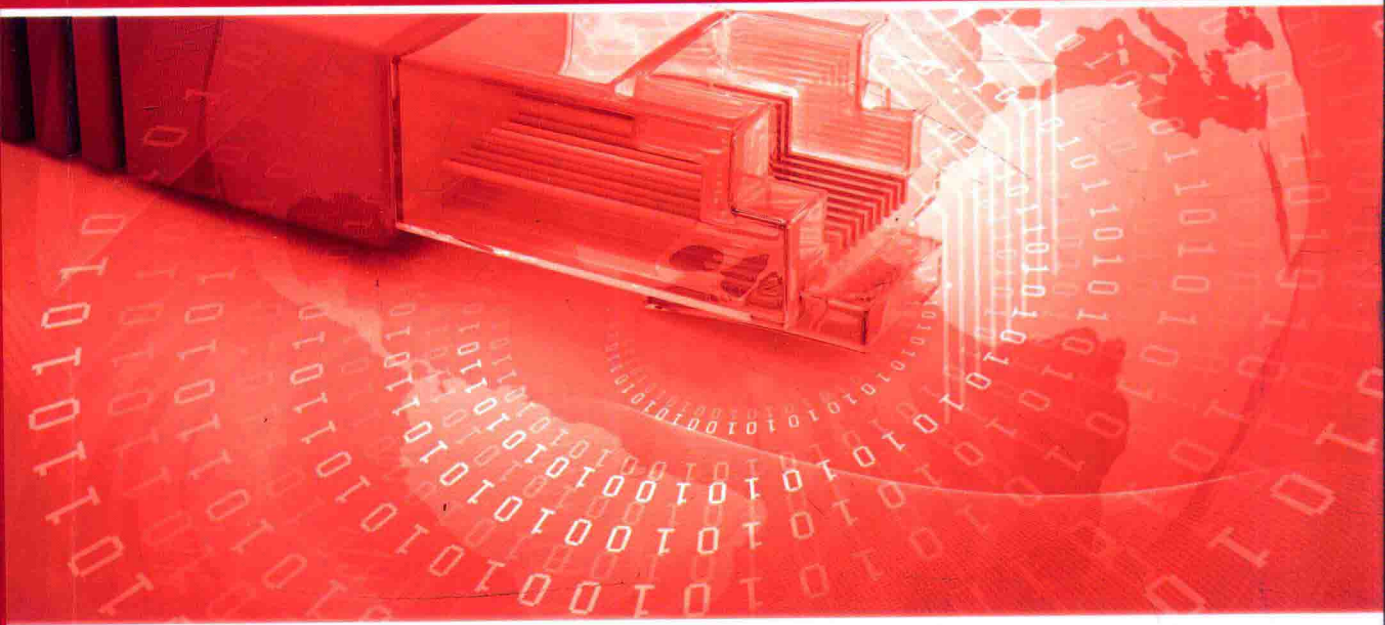
高等院校电工电子技术规划教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材

普通高等院校“十三五”规划教材

Electrical and
Electronic Technology

电工电子技术



田慕琴 陈惠英 主编 杨铁梅 任鸿秋 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

高等院校电工电子技术规划教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材

普通高等院校“十三五”规划教材

电工电子技术

田慕琴 陈惠英 主 编

杨铁梅 任鸿秋 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术 / 田慕琴, 陈惠英主编. —北京: 机械工业出版社, 2015.12
(高等院校电工电子技术规划教材)

ISBN 978-7-111-52308-6

I. 电… II. ①田… ②陈… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 298748 号

本书主要介绍电路理论基础、磁路基础、变压器和电机、可编程序控制器、模拟电路基础、现代电力电子器件及其应用、数字电路基础、模数转换技术、常用检测传感器, 最后还介绍仿真软件 Multisim 11.0 在电工电子技术中的应用和电工电子技术实验。本书适用于高等院校理工科非电类专业和计算机专业, 也可作为高职高专及成人教育相应专业的选用教材, 还可作为研究生和工程技术人员的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 27.75

书 号: ISBN 978-7-111-52308-6

定 价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

高等院校电工电子技术规划教材编审委员会

主任委员：王志功（东南大学）

副主任委员：

吴建强（哈尔滨工业大学） 陈后金（北京交通大学） 王 萍（天津大学）

张晓林（北京航空航天大学） 田作华（上海交通大学） 史国栋（常州大学）

邓建国（西安交通大学） 曾孝平（重庆大学） 孟 桥（东南大学）

戴先中（东南大学）

委员（按姓氏笔画排序）：

王成华（南京航空航天大学）

王黎明（中北大学）

冯文全（北京航空航天大学）

田慕琴（太原理工大学）

史仪凯（西北工业大学）

刘 晔（西安交通大学）

朱如鹏（南京航空航天大学）

李 辉（西北工业大学）

姚纓英（浙江大学）

姚福安（山东大学）

贾民平（东南大学）

殷瑞祥（华南理工大学）

谢明元（成都信息工程学院）

潘 岚（中国计量学院）

颜秋蓉（华中科技大学）

黎福海（湖南大学）

梅雪松（西安交通大学）

前 言

电工电子技术是高等院校非电类专业本科学生一门重要的技术基础课,其目的是培养学生掌握和运用电工技术、电子技术的基本理论、基本知识和基本技能。要求学生在学完本课程后,具备一定的分析和处理与电工、电子和控制等相关技术的实际能力,了解这些技术的最新发展和应用情况。

本教材是机械工业出版社规划教材,依据教育部颁布的高等工科院校电工电子技术课程教学基本要求,以及作者近年来在电工电子技术课程教学改革中的实际情况和教学方面的实践经验编写而成。本教材共15章,主要介绍电路理论基础、磁路基础、变压器和电机、可编程序控制器、模拟电路基础、现代电力电子器件及其应用、数字电路基础、模数转换技术、常用检测传感器,最后介绍仿真软件 Multisim 11.0 在电工电子技术中的应用和电工电子技术实验。

在内容的编写上本教材的指导思想如下。

(1) 本教材对基本概念、基本理论、基本分析方法做了详细的阐述,知识的引出顺其自然,难点的介绍由浅入深,重点的讲解特色突出。同时,通过例题进一步说明基本理论在实际中的应用,增强学生的工程意识与创新能力。

(2) 本教材内容精练先进,充分体现了理工科非电类电工电子技术的立体化教学模式的核心:注重理论教学;注重计算机仿真;注重动手能力与工程实践。

(3) 本教材在结构形式上也进行了大胆的改革,并将学科、行业的新知识、新技术、新成果融入教材,有利于宽口径人才创新能力的培养,特别适合于本科院校非电类专业的学生学习。

本教材由太原理工大学和太原科技大学联合编写,田慕琴、陈惠英担任主编,杨铁梅、任鸿秋担任副主编,李凤霞编写第1章、第9章,陈惠英编写第2章、第15章,陶晋宜编写第3章,王跃龙编写第4章,高妍编写第5章、第14章,任鸿秋编写第6章,申红燕编写第7章,吴申编写第8章,田慕玲编写第10章,田慕琴编写第11章,杨铁梅编写第12~13章,全书由田慕琴、陈惠英统稿。在教材的编写过程中,作者参考了大量优秀教材,受益匪浅,同时中国机械工业出版社的有关编辑及工作人员为本书的顺利出版也付出了积极的努力。在此一并致以诚挚的谢意。

最后,感谢使用本书的各高校同行教师和读者,虽然我们精心组织,认真编写,但难免有不妥和疏漏之处,恳请读者给予批评指正。

教学建议

本教材适用于理工科非电类专业的学生学习，是一本关于电学科的综合性和、导论性、实践性教材。它的主要内容包括：电路理论、模拟电子技术、数字电子技术、电机及其控制以及相关电路仿真知识。该课程的教学目的、教学目标以及教学建议等分述如下。

教学目的

(1) 掌握电路理论及常用分析方法，掌握基尔霍夫定律、支路电流法、结点电压法、叠加定理、戴维宁定理、诺顿定理，明确电路中电位的概念并学会计算，掌握暂态电路的分析方法，掌握换路定则，学会用换路定则确定电压、电流的初始值，掌握一阶线性电路的三要素法。

(2) 明确正弦交流电的基本概念，掌握正弦交流电的相量表示及计算方法，掌握相量和相量图，学会正弦交流电路稳态值的分析与计算，掌握功率因数的提高方法，掌握三相交流电路负载的星形(Y)联接和负载的三角形(Δ)联接的分析计算，了解交流电路的频率特性。

(3) 熟悉常用半导体器件与基本放大电路，掌握共发射极放大电路，明确集成运算放大器的概念及主要技术指标，掌握负反馈放大电路的基本类型及判断方法，熟练掌握集成运放的线性应用和非线性应用。

(4) 掌握直流稳压技术和现代电力电子器件及应用。

(5) 掌握数字逻辑基础和组合逻辑电路、时序逻辑电路的分析方法，熟悉数模、模数转换技术，学会编码器、译码器、数据选择器的应用。

(6) 明确三相异步电动机的基本结构和工作原理，学会用 PLC 实现控制的方法。

教学目标

以电路理论及分析方法为主线，以实践应用为拓展目标，理论教学与实验教学同步进行，来研究各种电路的基本原理、工作性能和实践应用。希望学生通过该课程的学习，能深刻理解电工电子技术的基本概念、基本理论，掌握一定的解题技巧，熟悉基本分析方法，获得必要的基本实验技能，从而提高分析问题、解决问题的能力，培养科研能力以及创新能力。

教学建议

教学内容	教学要点	课时安排	
		多学时	少学时
第 1 章 电路理论及电路分析方法	• 电路元件、基尔霍夫定律及应用 • 电路中电位的概念及计算 • 叠加定理、等效电源定理	6+2	6+2
第 2 章 暂态电路分析	• 换路定则与电压、电流初始值的确定 • 一阶线性电路暂态分析的三要素法 • RC 电路的暂态分析、RL 电路的暂态分析	5	4
第 3 章 正弦交流电路分析	• 正弦交流电的基本概念、相量表示及计算 • 功率因数的提高 • 频率特性 • 三相交流电路	12+4	9+4
第 4 章 变压器和电动机	• 磁路、变压器 • 三相异步电动机、单相异步电动机 • 同步电动机、直流电机、控制电机	8	6
第 5 章 PLC	• 工厂常用低压电器 • PLC 的基本结构与工作原理 • 基本电气控制电路	3+4	2+4
第 6 章 常用半导体器件及基本放大电路	• 半导体二极管及其应用 • 半导体三极管 • 基本放大电路及其分析 • 场效应管及其放大电路	11+2	8+2
第 7 章 集成运算放大器	• 放大电路中的负反馈 • 集成运放的线性应用 • 集成运放的非线性应用	9+2	7+2
第 8 章 直流稳压电源	• 整流与滤波电路 • 稳压电路 • 集成稳压器	3+2	2+2
第 9 章 现代电力电子器件及其应用	• 晶闸管 • 可控整流电路 • 逆变电路 • 斩波电路 • 变频电路	4	0
第 10 章 数字电路基础	• 数制、编码、卡诺图 • TTL 逻辑门、组合逻辑电路 • 译码器、编码器、数据选择器、加法器	8+4	8+4
第 11 章 触发器与时序逻辑电路	• 触发器 • 时序逻辑电路、计数器、寄存器 • 555 定时器、施密特触发器、单稳态触发器、多谐振荡器	10+4	10+4
第 12 章 D/A 和 A/D 转换技术	• A/D 转换技术 • D/A 转换技术	3	2

(续)

教学内容	教学要点	课时安排	
		多学时	少学时
第 13 章 常用检测传感器	• 电阻式传感器 • 电容式传感器 • 磁电式传感器 • 压电晶体传感器 • 热电式传感器 • 光电式传感器 • 气敏式和湿敏式传感器	6	0

说明:

- (1) 本教材为“电工电子技术”课程教材,授课学时数为 64~88 学时,不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数可酌情对教材内容进行适当取舍。例如,机械工程、过程装备与控制等专业,教材中的主要内容基本上可全讲,部分内容可作为课外阅读;其他专业可参照少学时课程安排,酌情对教材的部分章节内容进行适当删减,删减部分内容后,基本不会影响本书内容的连贯性。
- (2) 由于“电工电子技术”课程的教学内容较多,可分为上下两学期分开上。
- (3) 本教材包含了实验方面的内容,原则上,理论教学与实验同步进行,建议与“多学时”课程配套的实验学时数为 24 学时,而“少学时”课程可根据内容适当减少。

目 录

前言

教学建议

第1章 电路理论及电路分析方法 1

- 1.1 电路元器件 1
- 1.2 基尔霍夫定律 6
- 1.3 电路分析方法 8
- 1.4 电路中电位的概念及计算方法 10
- 1.5 叠加定理 11
- 1.6 等效电源定理 12
- 1.7 受控源及含受控源电路的分析 15
- 1.8 非线性电阻电路的分析 17
- 习题与仿真 18

第2章 暂态电路分析 20

- 2.1 电感元件和电容元件 20
- 2.2 换路定则与电压、电流初始值的确定 21
- 2.3 RC 电路的暂态分析 23
- 2.4 RL 电路的暂态分析 28
- 2.5 暂态电路的应用 30
- 习题与仿真 31

第3章 正弦交流电路分析 33

- 3.1 正弦交流电的基本概念 33
- 3.2 正弦交流电的相量表示及计算 34
- 3.3 电阻、电感、电容元件电压与电流的相量形式 36

3.4 正弦交流电路稳态值的分析与

计算 39

3.5 交流电路的频率特性 44

3.6 非正弦周期电压和电流 50

3.7 三相交流电路 52

习题与仿真 61

第4章 变压器和电动机 64

- 4.1 磁路 64
- 4.2 变压器 71
- 4.3 异步电动机 81
- 4.4 同步电动机 96
- 4.5 直流电机 98
- 4.6 控制电动机 102
- 习题与仿真 108

第5章 PLC 110

- 5.1 工厂常用低压电器 110
- 5.2 PLC 的基本结构与工作原理 120
- 5.3 PLC 的编程软元件 126
- 5.4 PLC 指令系统 131
- 5.5 基本电气控制电路 146
- 5.6 PLC 编程软件与仿真软件使用入门 159
- 习题与仿真 164

第6章 常用半导体器件及基本

放大电路 166

- 6.1 半导体二极管及其应用 166
- 6.2 半导体三极管 172
- 6.3 基本放大电路及其分析 176

6.4 功率放大电路	189	10.8 典型组合逻辑电路及其 应用	292
6.5 场效应晶体管及其放大 电路简介	193	10.9 组合逻辑电路的竞争与 冒险	304
习题与仿真	198	习题与仿真	305
第7章 集成运算放大器	202	第11章 触发器与时序逻辑电路	308
7.1 集成运算放大器简介	202	11.1 双稳态触发器	308
7.2 放大电路中的负反馈	205	11.2 时序逻辑电路的分析	314
7.3 集成运放的线性应用	211	11.3 典型时序逻辑电路及其 应用	317
7.4 集成运放的非线性应用	217	11.4 555 定时电路	328
7.5 正弦波发生器	221	习题与仿真	332
7.6 集成运放的正确使用	223	第12章 D/A 和 A/D 转换技术	336
习题与仿真	224	12.1 D/A 转换技术	336
第8章 直流稳压电源	226	12.2 A/D 转换技术	340
8.1 整流与滤波电路	226	习题与仿真	342
8.2 稳压电路	231	第13章 常用检测传感器	344
8.3 集成稳压器	234	13.1 传感器的构成与分类 简介	344
8.4 串联开关型稳压电源	236	13.2 电阻式传感器	344
习题与仿真	240	13.3 电容式传感器	348
第9章 现代电力电子元件及其 应用	243	13.4 磁电式传感器	351
9.1 晶闸管	243	13.5 压电晶体传感器	353
9.2 典型的全控型器件	247	13.6 热电式传感器	355
9.3 功率集成电路	251	13.7 光电式传感器	358
9.4 可控整流电路	253	13.8 气敏式和湿敏式传感器	362
9.5 逆变电路	256	13.9 传感器的选用原则	363
9.6 斩波电路	259	习题与仿真	365
9.7 变频电路	260	第14章 Multisim 11.0 在电工电子 技术中的应用	366
习题与仿真	263	14.1 Multisim 11.0 简介	366
第10章 数字电路基础	265	14.2 Multisim 11.0 应用举例	370
10.1 数制及编码	265	第15章 电工电子技术实验	402
10.2 逻辑代数基础	270	15.1 电工电子技术实验须知	402
10.3 逻辑函数的化简	274	15.2 电工电子技术实验内容	403
10.4 分立元件门电路	279	参考文献	432
10.5 TTL 集成门电路	281		
10.6 CMOS 逻辑门	286		
10.7 组合逻辑电路的分析与 设计	290		

电路理论及电路分析方法

本章以电路元件和电路基本物理量为基础,重点介绍电路的基本概念、基本定律和线性电路的几种基本分析方法,为学习各种类型的电工电子电路建立必要的基础。

1.1 电路元器件

电路是为实现某种功能,由电路元器件或电气设备组合起来,供电流或信号流通的路径。电路的类型和功能是多种多样的,但其主要作用是,实现电能的传输、分配和转换,以及实现信号的传递与处理。如电炉在电流通过时将电能转换成热能,电视机将接收到的信号经过处理,转换成图像和声音。电路的作用虽然不同,但一般是由电源(或信号源)、中间环节、负载等三部分组成的。电路分析中涉及的电路是由理想元器件构成的,称为电路模型(简称电路)。所谓理想元器件是将实际元器件的次要因素忽略,仅考虑主要物理性质的元器件,简称元件。

1.1.1 电流、电压和功率

在电路分析中,对于元件,我们注重的是它的电压和电流之间的关系,即外特性。为了建立描述外特性的电压、电流约束方程,需先对这些元件中流过的电流和两端的电压假定一个方向,这个任意假定的方向称为参考方向或正方向。当根据参考方向计算出电压或电流的值为正时,说明该电流或电压参考方向与实际方向一致;反之则相反。而对电压或电流的实际方向,物理学中是这样规定的,电流的方向是正电荷移动的方向;电压的方向是从高电位指向低电位的方向;电动势则是在电源内部由低电位指向高电位。

参考方向的表示方法有多种,一般用箭头表示,如图 1-1a 所示,也可用参考极性“+”“-”表示,如图 1-1b 所示,还可用双下标表示,图 1-1c 所示的电流 i_{ab} ,表示电流由 a 端流向 b 端; u_{ab} 表示电压降的方向是由 a 指向 b。

虽然电压和电流的参考方向可以任意假定,但在分析电路时,需要考虑电压和电流参考方向的相对关系,当电压和电流的参考方向选取一致时,称为关联参考方向,如图 1-1c 所示,否则称为非关联参考方向。对于初学者来说,参考方向的概念容易被忽视,但它在电路课程中非常重要,它贯穿于电路分析的整个过程,这些在以后的学习中即可体会到。在电路的分析计算中,需要考虑的另一个重要问题就是元件的功率。在引入参考方向后,元件的功率可按下式计算。

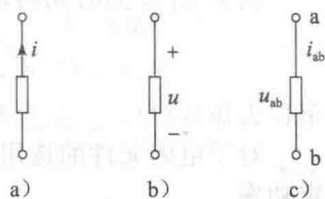


图 1-1 参考方向及其关联性

元件两端电压和流过的电流为关联参考方向时,其功率为

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

如果元件两端电压和流过的电流为非关联参考方向,则其功率为

$$P = -UI \quad (1-2)$$

在此规定下,将电流 I 和电压 U 代入上述式中,如果计算结果为 $P > 0$,则表示元件吸收功率,该元件为负载性质元件;反之, $P < 0$ 时,表示元件发出功率,该元件为电源

性质元件。

【例 1-1】在图 1-2 所示的电路中, 已知: $U_1=20\text{V}$, $I_1=2\text{A}$, $U_2=10\text{V}$, $I_2=-1\text{A}$, $U_3=-10\text{V}$, $I_3=-3\text{A}$, 试求图中各元件的功率, 并说明各元件的性质。

解: 由功率计算的规定, 可得

元件 1 功率为 $P_1 = -U_1 I_1 = -20 \times 2\text{W} = -40\text{W}$

元件 2 功率为 $P_2 = U_2 I_2 = 10 \times (-1)\text{W} = -10\text{W}$

元件 3 功率为 $P_3 = -U_3 I_1 = -(-10) \times 2\text{W} = 20\text{W}$

元件 4 功率为 $P_4 = -U_2 I_3 = -10 \times (-3)\text{W} = 30\text{W}$

元件 1 和元件 2 发出功率, 是电源, 元件 3 和元件 4 吸收功率, 是负载。上述计算满足 $\sum P=0$, 说明计算结果无误。

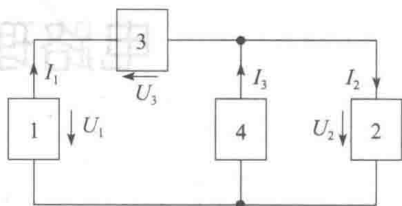


图 1-2 例 1-1 图

1.1.2 电阻元件

在任意时刻, 能用 $u-i$ 平面上一条曲线表现其外部特性, 且具有变电能为热能特征的元件称为电阻元件。它反映实际电路元件或设备消耗电能特性, 如电炉、白炽灯等。电阻元件的符号及外特性曲线如图 1-3 所示。

如果电阻元件的外特性曲线是一条通过坐标原点的直线, 则称该电阻元件为线性电阻元件, 如图 1-3b 所示, 线性电阻元件的阻值为—常数。当电路中所有元件均是线性元件时, 该电路称为线性电路。

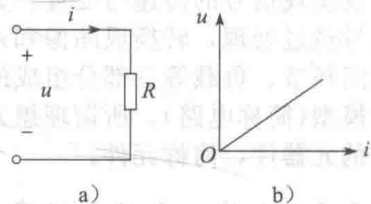


图 1-3 电阻元件的符号及伏安特性

线性电阻两端的电压和流过它的电流之间的关系服从欧姆定律。当 u 与 i 的参考方向为关联参考方向时, 有

$$u = Ri \quad (1-3)$$

为非关联参考方向时, 有

$$u = -Ri \quad (1-4)$$

式中: u 的单位为伏(V); i 的单位为安(A); R 的单位为欧(Ω), 或千欧(k Ω), 或兆欧(M Ω), $1\text{k}\Omega=10^3\Omega$, $1\text{M}\Omega=10^6\Omega$ 。

电阻元件是耗能元件, 在关联参考方向下, 其消耗的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-5)$$

从 t_1 到 t_2 的时间内, 消耗的能量为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} i^2 R dt \quad (1-6)$$

单位为焦耳(J)。

对于电阻元件的选用, 主要考虑两个参数, 一是电阻元件的阻值, 二是电阻元件的额定功率。

1.1.3 电压源与电流源

实际电源是指给电路提供能量的电路元件或电气设备, 如电池、发电机、稳压电源、稳流电源等。电源是把非电能转化为电能的装置, 可用两种不同的模型来表示。一种是电压源模型, 简称为电压源; 一种是电流源模型, 简称为电流源。

1. 电压源

在电压源模型中, 往往用一个不含内阻的理想电压源和内阻 R 串联来等效—实际电压源。所谓理想电压源(恒压源)是指电源的输出电压不受外电路的影响, 总能保持为某一

个恒定值 U_s 或按某种恒定规律变化, 而其输出电流却由外部电路决定的电压源, 其外特性和图形符号分别如图 1-4a、b 所示。

在对电路进行分析时, 实际电压源的输出电压会受到外电路的影响, 图 1-5a、b 所示的是实际电压源的外特性及电路模型。其输出电压与电流之间的关系式为

$$U = U_s - IR_o \quad (1-7)$$

式中: U 为电压源的输出电压; U_s 为恒压源的电压; I 为电压源的输出电流; R_o 为电压源的内阻。

当向外电路供电时, 电压源的输出电压 U 随负载电流 I 增大而逐渐降低; 电压源的内阻越小, 输出电压就越接近恒压源的电压 U_s , 当内阻 $R_o = 0$ 时, 电压源就是恒压源。电压源在电路中不一定总发出功率, 也可能吸收功率。如对蓄电池充电时, 蓄电池就吸收功率。

2. 电流源

当实际电源的输出电流几乎不受负载电压变化的影响时, 这种电源称为理想电流源(恒流源)。它的端电压值取决于外电路的情况。图 1-6 所示的是理想电流源的外特性和符号。

如果用电流源来模拟实际电源, 则应采用理想电流源与内部损耗电阻的并联组合, 如图 1-7 所示。此时, 电路中电压、电流的约束关系为

$$I = I_s - \frac{U}{R_o} \quad (1-8)$$

电流源在电路中也可吸收功率, 读者不妨给出一种电流源吸收功率的电路。

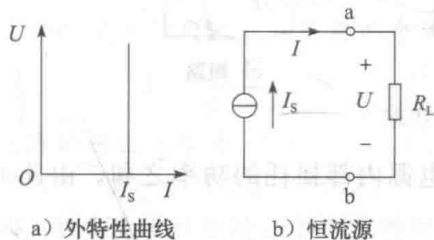


图 1-6 恒流源外特性曲线与符号

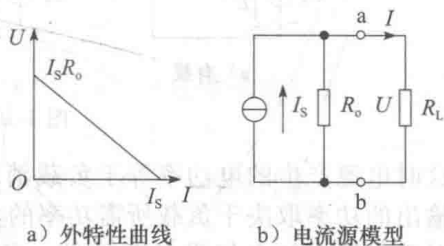


图 1-7 电流源外特性曲线和模型

【例 1-2】 图 1-8 所示电路中, 已知开路电压 $U_o = 110\text{V}$, 又负载电阻为 10Ω 时, $I = 10\text{A}$ 。求(1) 电压源电压 U_s 及内阻 R_o 各为多大? (2) 负载电阻为多大值时负载 I 为 5A ?

解: (1) 因为开路时电流为 $I = 0$,

所以 $U_s = U_o = 110\text{V}$

又 $U_s = (R_L + R_o)I$

故 $R_o = \frac{U_s}{I} - R_L = \left(\frac{110}{10} - 10\right)\Omega = 1\Omega$

(2) 由上式可得

$$R_L = \frac{U_s}{I} - R_o = \left(\frac{110}{5} - 1\right)\Omega = 21\Omega$$

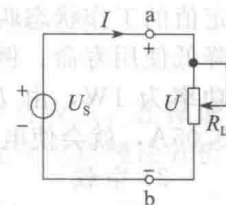


图 1-8 例 1-2 图

【例 1-3】 图 1-9 所示电流源中, 当输出端短路时, 短路电流 $I=5\text{A}$; 当负载为 5Ω 时, 负载电流 $I=4\text{A}$ 。求(1)理想电流源电流 I_S 及内阻 R_o ; (2)欲使负载电流 $I=2\text{A}$, 负载电阻 R_L 等于多少?

解: (1) 当输出端短路时, $I_S=I=5\text{A}$

又 $R_L=5\Omega$ 时, $U=IR_L=5\times 4\text{V}=20\text{V}$, $I_o=I_S-I=1\text{A}$

$$R_o = \frac{U}{I_o} = 20\Omega$$

$$(2) R_L = \frac{R_o(I_S - I)}{I} = \frac{20 \times (5 - 2)}{2} \Omega = 30\Omega$$

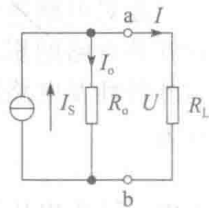


图 1-9 例 1-3 图

3. 电源的三种状态

1) 有载

在图 1-10a 所示电路中, 当电源与负载接通且电路中有电流流过时, 这种工作状态称为有载工作状态。电流大小为

$$I = \frac{E}{R_o + R_L} = \frac{U_s}{R_o + R_L} \quad (1-9)$$

式中: R_L 为负载电阻; R_o 为电源的内阻, 通常 R_o 很小。

负载两端的电压也就是电源输出电压, 即

$$U = E - IR_o = U_s - IR_o \quad (1-10)$$

此时电路中的功率平衡关系为

$$P_{R_L} = P_E - P_{R_o} = EI - I^2 R_o = UI \quad (1-11)$$

式中: EI 为电源产生的功率; UI 为负载消耗的功率; $I^2 R_o$ 为电源内部损耗的功率。

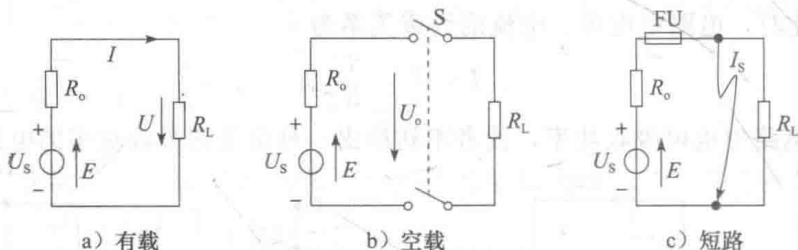


图 1-10 电源的三种状态

这时电源产生的电功率等于负载消耗的功率与电源内部损耗的功率之和。由此可见, 电源输出的功率取决于负载所需功率的大小。

对于电路中的电气设备及元件, 其工作电流、电压和功率等都有其额定值, 分别用 I_N 、 U_N 、 P_N 表示。电气设备和元件工作在额定状态时, 称为满载; 当电流和功率低于额定值的工作状态叫轻载; 高于额定值的工作状态叫过载, 过载可能引起电气设备的损坏或降低使用寿命。例如, 一个标有 1W 、 400Ω 的电阻, 即表示该电阻的阻值为 400Ω , 额定功率为 1W , 由 $P=I^2 R$ 的关系, 可求得它的额定电流为 0.05A 。使用时电流值超过 0.05A , 就会使电阻过热, 甚至损坏。

2) 空载

在图 1-10b 所示电路中, 开关打开, 电源与负载断开, 电路中电流为零, 电源产生的功率和输出的功率都为零, 电路处于开路状态, 称为空载。此时电源两端的电压称为开路电压, 用 U_o 表示, 其值等于电源的电动势 E (或 U_s)。即

$$U_o = E = U_s \quad (1-12)$$

3) 短路

在图 1-10c 所示电路中, 由于某种原因, 电源两端被直接连在一起, 造成电源短路,

称电路处于短路状态。

电源短路时外电路的电阻可视为零,因此电源与负载两端的电压为零,流过负载的电流及负载的功率也都为零。这时电源的电动势全部降在内阻上,形成短路电流 I_s ,即

$$I_s = \frac{E}{R_o} = \frac{U_s}{R_o} \quad (1-13)$$

而电源产生的功率将全部消耗在内阻中,即

$$P_E = EI_s = I_s^2 R_o$$

电源短路是一种严重事故。因为短路时在电流的回路中仅有很小的电源内阻,所以短路电流很大,将大大地超过电源的额定电流,可能致使电源遭受机械的与热的损伤或毁坏。为了预防短路事故发生,通常在电路中接入熔断器(FU)或自动断路器,以便短路时,能迅速地把故障电路自动切除,使电源、开关等设备得到保护。

在电工、电子技术中,为了某种需要,如改变一些参数的大小,可将部分电路或某些元件两端予以短接,这种人为的工作短接或进行某种短路实验,应该与短路事故相区别。

【例 1-4】 有一电源设备,额定输出功率为 400W,额定电压为 110V,电源内阻 R_o 为 1.38Ω ,当负载电阻分别为 50Ω 、 10Ω 或发生短路事故时,试求电源电动势 E 及上述不同负载情况下电源的输出功率。

解:先求电源的额定电流 I_N ,有

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{400}{110} \text{A} = 3.64 \text{A}$$

再求电源电动势 E ,有

$$E = U_N + I_N R_o = (110 + 3.64 \times 1.38) \text{V} = 115 \text{V}$$

(1) 当 $R_L = 50\Omega$ 时,求电路的电流 I ,有

$$I = \frac{E}{R_o + R_L} = \frac{115}{1.38 + 50} \text{A} = 2.24 \text{A} < I_N \quad (\text{电源轻载})$$

电源的输出功率为

$$P_{R_L} = I^2 R_L = 2.24^2 \times 50 \text{W} = 250.88 \text{W} < P_N \quad (\text{轻载})$$

(2) 当 $R_L = 10\Omega$ 时,求电路的电流,有

$$I = \frac{E}{R_o + R_L} = \frac{115}{1.38 + 10} \text{A} = 10.11 \text{A} > I_N \quad (\text{电源过载})$$

电源的输出功率为

$$P_{R_L} = I^2 R_L = 10.11^2 \times 10 \text{W} = 1022.12 \text{W} > P_N \quad (\text{电源过载})$$

(3) 电路发生短路时,求电源的短路电流 I_s ,有

$$I_s = \frac{E}{R_o} = \frac{115}{1.38} \text{A} = 83.33 \text{A} \gg I_N$$

如此大的短路电流如不采取保护措施迅速切断电路,电源及导线等会被毁坏。

4. 电压源与电流源的等效变换

由图 1-5a 和图 1-7a 可见,在电压源和电流源的外特性曲线上取两个对应点,在保证外端电路一致情况下,电压源与电流源对外端电路所起的作用相同,因此在电路理论分析中,为分析方便,常将电压源与电流源进行等效变换

(见图 1-11)。其等效条件为

$$I_s = \frac{U_s}{R_o} \quad \text{或} \quad U_s = I_s R_o \quad (1-14)$$

值得注意的是:

(1) 两种电源之间的等效关系是仅对外电路而言的,至于电源内部,一般是不等效的。

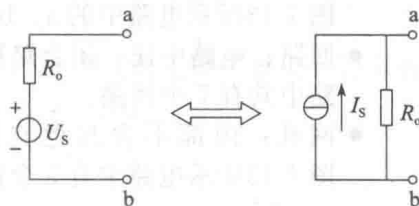


图 1-11 电压源和电流源的等效变换

(2) 变换时应注意极性, I_s 的流出端要对应 U_s 的“+”极。

(3) 恒压源和恒流源之间不能进行等效变换。

【例 1-5】 试用电压源与电流源等效变换的方法计算图 1-12a 所示电路中 5Ω 电阻上的电流 I 。

解: 在图 1-12a 所示电路中, 将与 $15V$ 理想电压源并联的 4Ω 电阻除去(断开), 并不影响该并联电路两端的电压; 将与 $3A$ 理想电流源串联的 1Ω 电阻除去(短接), 并不影响该支路中的电流, 这样简化后得出图 1-12b 所示的电路。

然后通过等效变换, 图 1-12b 所示电路依次等效为图 1-12c、d、e 所示电路, 于是根据图 1-12e 所示电路得

$$I = \frac{24 - 10}{2 + 3 + 5} A = 1.4 A$$

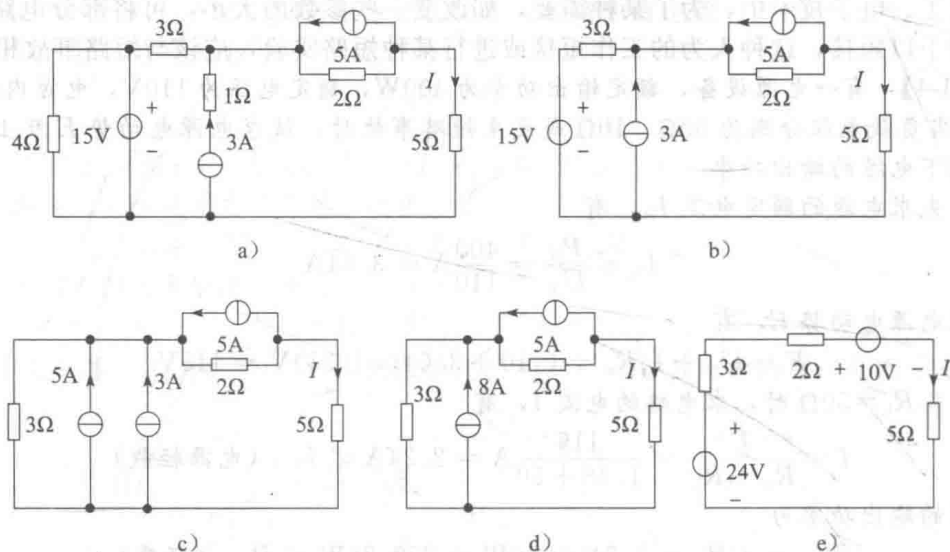


图 1-12 例 1-5 电路图

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫电流定律和电压定律是分析电路问题的基本定律。基尔霍夫电流定律应用于结点, 确定电路中各支路电流之间的关系; 基尔霍夫电压定律应用于回路, 确定电路中各部分电压之间的关系。基尔霍夫定律是一个普遍适用的定律, 既适用于线性电路, 也适用于非线性电路, 它仅与电路的结构有关, 而与电路中的元件性质无关。为了更好地掌握该定律, 结合图 1-13 所示电路, 先解释几个有关名词术语。

- **支路:** 电路中的每一条分支, 每个分支中至少包含一个二端元件。支路中流过的电流, 称为支路电流。例如, 图 1-13 所示电路中有 6 条支路。
- **结点:** 三条或三条以上支路的联结点。例如, 图 1-13 所示电路中的 a、b、c、d 点即为结点。
- **回路:** 电路中任一闭合路径。例如, 图 1-13 所示电路中共有 7 个回路。
- **网孔:** 内部不含其他支路的单孔回路。例如, 图 1-13 所示电路中有 3 个网孔。

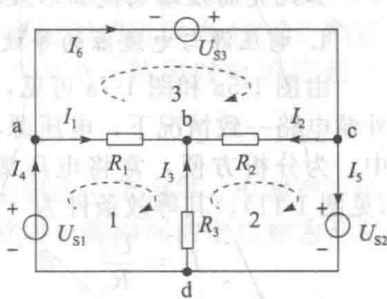


图 1-13 电路举例

1.2.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

1. 定律内容

在任一瞬时, 流入某一结点的电流之和恒等于流出该结点的电流之和, 即

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}}$$

如图 1-14 所示电路中, 对于结点 a, 可写出

$$I_2 + I_s = I_1$$

移项后可得

$$I_2 + I_s - I_1 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-15)$$

在任一瞬时, 任一结点上电流的代数和恒等于零。习惯上, 电流流入结点取正号, 流出结点取负号。

2. 定律推广

KCL 不仅适用于结点, 也适用于任一闭合面。这种闭合面有时也称为广义结点(扩大了结点)。

如图 1-15 所示, 已知 $I_1=2\text{A}$ 、 $I_3=-3\text{A}$ 、 $I_4=5\text{A}$, 试求 I_2 。由上可知, 欲求未知量, 需根据 KCL 对 a、b、c、d 四个结点列电流方程, 且已知条件不够, 如将闭合面看成一个广义结点, 则有

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

得

$$I_2 = -4\text{A}$$

式中负号说明, 参考方向与实际方向相反。

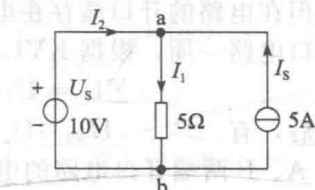


图 1-14

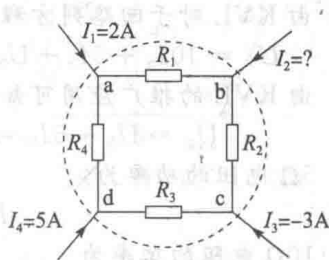


图 1-15 KCL 的推广应用

【例 1-6】 试求图 1-14 所示电路中各支路的电流和各元件的功率。

解: 图 1-14 所示电路为并联电路, 并联的各元件电压相同, 均为 $U_s=10\text{V}$ 。

由欧姆定律, 有

$$I_1 = \frac{10}{5} = 2\text{A}$$

由 KCL 对于结点 a 列方程得

$$I_2 = I_1 - I_s = 2 - 5 = -3\text{A}$$

电阻的功率为

$$P_R = I_1^2 R = 2^2 \times 5\text{W} = 20\text{W}$$

恒压源的功率为 $P_{U_s} = -U_s I_2 = -10 \times (-3)\text{W} = 30\text{W}$ (吸收 30W)

恒流源的功率为 $P_{I_s} = -U_s I_s = -10 \times 5\text{W} = -50\text{W}$ (发出 50W)

1.2.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

1. 定律内容

在任一瞬时, 沿任一闭合回路绕行一周, 则在这个方向上电位升之和恒等于电位降之和, 即

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}}$$

图 1-13 所示电路中, 在回路 1 (即回路 abda) 的方向上, 结合欧姆定律可看出 a 到 b 电位降了 $I_1 R_1$, b 到 d 电位升了 $I_3 R_3$, d 到 a 电位升了 U_{s1} , 则可写出

$$U_{s1} + I_3 R_3 = I_1 R_1$$

移项后可得

$$U_{s1} + I_3 R_3 - I_1 R_1 = 0$$