

高等学校教材

电工电子技术

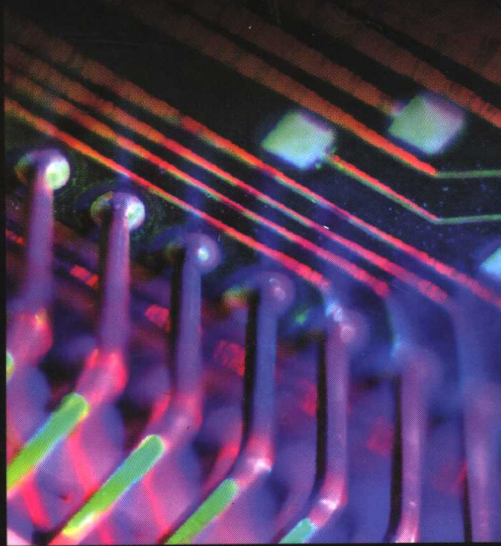
上册

电路与模拟 电子技术基础

太原理工大学电工基础教学部 编

李晓明 主编

王建平 渠云田 副主编



高等教育出版社

高等学校教材

电工电子技术

上册

电路与模拟电子技术基础

太原理工大学电工基础数学部编

李晓明 主编

王建平 渠云田 副主编

高等教育出版社

内容简介

本书是根据教育部面向 21 世纪电工电子技术课程教改方案,结合山西省教育厅 21 世纪初高等教育重点教改项目——“非电类理工科专业电工电子课程模块教学改革的研究与实践”而编写的教材。

本书的基本特点是传统理论内容精练,结构顺序合理,充分引用电工电子新技术与现代化分析手段,淡化计算技巧,注重基本概念与电气应用范例,以强化学生电气技能与素质的培养。

本书上册内容包括电路分析基础、暂态分析、交流电路、模拟电子技术基础、集成运算放大器、集成直流电源与晶闸管电路等,共 8 章。并与 EWB 教学平台配套有相应的 EDA 分析与仿真习题。

本书是高等学校理工科非电类专业和计算机专业的适用教材。也可作为高职高专及成人教育相应专业的选用教材,还可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术. 上册, 电路与模拟电子技术基础/李晓明

主编. —北京: 高等教育出版社, 2004 重印

ISBN 7-04-011860-2

I. 电... II. 李... III. ① 电工技术 - 高等学校 - 教材② 电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000543 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	河北新华印刷一厂		
开 本	787×1092 1/16	版 次	2003 年 2 月第 1 版
印 张	16	印 次	2004 年 5 月第 3 次印刷
字 数	390 000	定 价	18.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

21 世纪是科学技术飞速发展的时代,也是竞争激烈的时代。为了新一代大学生能适应这个高科技和竞争激烈的时代,根据教育部面向 21 世纪电工电子技术课程教改要求,结合我校电工电子系列课程建设以及山西省教育厅重点教改项目——“21 世纪初非电类专业电工学课程模块教学的改革与实践”,在我们已经使用数年的电工电子技术系列讲义的基础上,经过多次试用与反复修改,将以教材形式面诸于世。

本书是理工科非电类专业与计算机专业本、专科适用的电工电子技术系列教材之一;也是我们教改项目中的第一模块教材,即计算机专业与机械、机电类专业适用教材;同时也是兄弟理工类院校相应专业择用的教材之一;也可作为高职高专和职业技术学院相应专业的择用教材。参考学时为 110~130 学时。

本教材的基本特点是:精练,删减传统内容力度较大;结构顺序变动较大;集成电路与数字电子技术部分内容大大加强;电气控制技术部分系统性增强;电工电子新技术内容与现代分析手段大量引入;突出电气技能与素质培养方面的内容及其在工业企业中的应用范例明显增多;基本概念、分析与计算、EDA 仿真等各类习题分明。

本教材在突出电气技能与素质培养方面增设了不少电工与电子技术应用电路及设计内容。如调光、调速电路、测控技术电路、小型变压器设计与绕制、电动机定子绕组的排布、常用集成运放芯片与数字逻辑芯片介绍及其典型应用电路、世界各主要厂家的 PLC 性能简介、使用 isp-DesignExpert 软件开发 ispLSI 器件等新技术应用内容。

依据电工电子技术的发展趋势及其在机械、机电类专业的应用特点,并兼顾计算机专业的教学需求,此教材的上册为“电路与模拟电子技术基础”,下册为“数字与电气控制技术基础”。

为了有效减少课堂教学时数,增加课内信息量,提高教学效率,并以提高学生技能素质与新技术、新手段的应用能力为目标,使用本教材应建立 EDA 机辅分析教学平台,结合教学方法及教学手段的改革,并与实践教学环节相配合,方能更有效地发挥其效能。

本教材由太原理工大学电工基础教学部组织编写,上册由李晓明任主编,王建平、渠云田任副主编,下册由渠云田任主编,王建平、李晓明任副主编。王建平编写第 1、2、4、5、8 章,李晓明编写第 3、6、15 章,渠云田编写第 9、10、11、12、13、14 章,陶晋宜编写第 16 章,太原理工大学信息学院夏路易教授编写第 7 章与下册的附录 1,太原师范学院周全寿副教授参与了本书附录与部分节次的编写。渠云田、李晓明、王建平三人对全书作了仔细的修改,并最后定稿。

本教材上册由北京理工大学刘蕴陶教授主审,下册由北京理工大学庄效桓教授主审。两位教授对书稿进行了详细的审阅,并提出许多宝贵的意见和修改建议。我们根据提出的意见和建议进行了认真的修改。在本教材编写和出版过程中,大连理工大学唐介教授、太原理工大学信息学院夏路易教授、太原师范大学周全寿副教授以及太原理工大学电工基础教学部使用过本教材讲义的所有教师,给予了极大的关心和支持,在此一并对他们表示衷心的感谢。

同时,编写本教材过程中,我们也曾参考了部分优秀教材,在此,谨对这些参考书的作者表示感谢。

由于我们水平有限,书中缺陷和疏漏在所难免,恳请使用本教材的教师和读者批评指正,为提高电工电子技术教材的质量而共同努力。

编 者

2002年10月

目 录

第 1 章 电路分析基础	1	2.4 微分电路和积分电路	41
1.1 电路的基本概念	1	2.4.1 微分电路	41
1.1.1 电路及电路模型	1	2.4.2 积分电路	42
1.1.2 电流、电压的参考方向	2	2.5 RL 电路的暂态分析	43
1.1.3 电路的工作状态	4	* 2.6 暂态分析的运算法	45
1.1.4 电路中的电位	6	2.6.1 拉普拉斯变换及反变换	45
1.2 电路的基本元件	8	2.6.2 应用拉氏变换分析线性电路	46
1.2.1 独立电源元件	8	习题	49
1.2.2 电阻、电感和电容元件	10	1. 概念题	49
1.3 基尔霍夫定律	13	2. 计算和仿真题	50
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	14	第 3 章 交流电路	53
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	14	3.1 正弦交流量及其表示法	53
1.3.3 基尔霍夫定律的应用——支路电 流法	16	3.1.1 正弦交流电的基本概念	53
1.4 电路的常用定理	17	3.1.2 正弦量的相量表示法	55
1.4.1 弥尔曼定理	17	3.2 交流电路的分析与计算	58
1.4.2 叠加定理	19	3.2.1 单一参数的交流电路	58
1.4.3 等效电源定理	20	3.2.2 串联交流电路	61
1.5 含受控源电路的分析	24	3.2.3 并联及混联交流电路	64
1.5.1 受控源的类型和符号	24	3.2.4 功率因数的提高	66
1.5.2 含受控源电路的分析	25	3.2.5 复杂交流电路的计算方法	68
习题	27	3.3 交流电路的频率特性	69
1. 概念题	27	3.3.1 RC 电路的频率特性	69
2. 计算和仿真题	29	3.3.2 LC 谐振电路及其频率特性	72
第 2 章 电路的暂态分析	32	* 3.4 非正弦周期信号电路的分析	75
2.1 概述	32	3.4.1 非正弦周期信号的分解	75
2.2 电路初始值和稳态值的确定	33	3.4.2 非正弦周期信号的分析与计算	76
2.2.1 换路定则及电路初始值的确定	33	3.5 三相交流电路	78
2.2.2 电路稳态值的确定	35	3.5.1 三相交流电的产生与联结	78
2.3 RC 电路的暂态分析	35	3.5.2 负载的星形(Y)联结	80
2.3.1 一阶电路的三要素公式	35	3.5.3 负载的三角形(Δ)联结	83
2.3.2 一阶 RC 电路的响应	37	3.5.4 三相电路的功率	85
		3.5.5 安全用电	85

习题	88	5.7 差分放大电路	144
1. 概念题	88	5.7.1 差分放大电路的工作情况	145
2. 计算和仿真题	89	5.7.2 差分放大器的分析	146
第4章 二极管及其应用	93	5.7.3 差分放大器的输入 输出方式	147
4.1 PN结和二极管	93	5.8 功率放大器	149
4.1.1 PN结的单向导电性	93	5.8.1 概述	149
4.1.2 二极管	94	5.8.2 互补对称功率放大器	151
4.1.3 二极管的等效电路及其应用	95	5.8.3 集成功率放大器	155
4.2 特殊二极管	98	5.9 场效晶体管放大电路	157
4.2.1 稳压二极管	98	5.9.1 共源极放大电路	157
4.2.2 光电二极管	99	5.9.2 共漏极放大电路——源极输出器	159
4.2.3 发光二极管	100	习题	160
4.3 二极管整流及滤波电路	100	1. 概念题	160
4.3.1 单相整流电路	101	2. 计算和仿真题	164
4.3.2 滤波电路	103	第6章 集成运算放大器	166
4.4 稳压管稳压电路	106	6.1 集成运算放大器简介	166
习题	108	6.1.1 集成运放的结构与符号	166
1. 概念题	108	6.1.2 集成运放的主要技术指标及其 选用注意事项	167
2. 计算和仿真题	110	6.1.3 集成运放的电压传输特性与理 想化模型	169
第5章 晶体管及其基本放大电路	112	6.2 放大电路中的反馈	171
5.1 晶体三极管	112	6.2.1 反馈的基本概念	171
5.1.1 晶体管结构及其放大作用	112	6.2.2 反馈的判断	173
5.1.2 晶体管的特性曲线及主要参数	113	6.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	176
5.1.3 晶体管的开关应用——非门	118	6.3 集成运放的线性应用	177
5.2 场效晶体管	119	6.3.1 比例运算电路	178
5.2.1 绝缘栅型场效晶体管	119	6.3.2 加、减法运算电路	179
5.2.2 场效晶体管主要参数	122	6.3.3 积分、微分运算电路	180
5.3 晶体管共发射极放大电路	124	6.3.4 测量放大电路	181
5.3.1 共发射极放大电路的组成	124	6.3.5 有源滤波器	182
5.3.2 静态分析	125	6.4 集成运放的非线性应用	185
5.3.3 动态分析	126	6.4.1 电压比较器	185
5.4 静态工作点的稳定	134	6.4.2 方波发生器	187
5.4.1 温度对静态工作点的影响	134	6.5 正弦波发生器	189
5.4.2 分压式偏置放大电路	134	6.5.1 自激振荡	189
5.5 射极输出器	137	6.5.2 文氏桥式振荡器	190
5.6 多级放大电路	140	* 6.6 常用集成运放芯片介绍	191
5.6.1 阻容耦合放大电路	141		
5.6.2 直接耦合放大电路	143		

6.6.1 常用集成运放芯片	191	8.2.2 单相桥式半控整流电路	215
6.6.2 常用集成比较器芯片	193	8.3 单结晶体管触发电路	216
6.6.3 函数发生器芯片	193	8.3.1 单结晶体管	216
习题	194	8.3.2 单结晶体管振荡电路	218
1. 概念题	194	8.3.3 单结晶体管同步触发电路	219
2. 计算和仿真题	196	8.4 晶闸管的保护	220
第7章 直流稳压电源	199	* 8.5 交流调压电路	221
7.1 串联型稳压电源	199	8.5.1 单相交流调压电路	221
7.1.1 稳压电源的主要指标	199	8.5.2 双向晶闸管及其应用	222
7.1.2 串联反馈式稳压电路的工作原理	199	* 8.6 无源逆变电路	223
7.1.3 基准电压源	200	* 8.7 直流调压电路(斩波器)	224
7.1.4 简单分立元件组成的稳压电路	201	8.7.1 全控型电力电子器件简介	224
7.2 集成稳压器	202	8.7.2 直流调压电路(斩波器)	225
7.2.1 三端固定集成稳压器	202	习题	226
7.2.2 三端可调集成稳压器	202	1. 概念题	226
7.2.3 低压差三端稳压器	203	2. 计算和仿真题	227
7.3 串联开关式稳压电源	203	附录	229
习题	208	附录1 电阻器、电容器及其标称值	229
1. 概念题	208	附录2 半导体分立器件型号命名法	231
2. 计算和仿真题	208	附录3 部分半导体器件型号和参数	232
第8章 电力电子器件及其应用	210	附录4 半导体集成电路型号命名法	235
8.1 晶闸管	210	附录5 部分半导体集成电路的型号 和主要参数	237
8.1.1 晶闸管的结构及工作原理	210	中英名词对照	238
8.1.2 晶闸管的伏安特性及主要参数	211	主要参考书目	246
8.2 可控整流电路	213		
8.2.1 单相半波可控整流电路	213		

第 1 章 电路分析基础

电工电子技术的应用离不开电路。电路由电路元件构成。本章着重介绍电路的基本概念、常用电路元件、电路的基本定律和电路常用的分析方法,为学习各种类型的电工电子电路建立必要的基础。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路及电路模型

1. 电路的组成和作用

从日常生活和生产实践可以体会到,要用电一般要用导线、开关等将电源和用电设备或用电器连接起来,构成一个电流流通的闭合路径。这就是所谓电路。

电路的形式是多种多样的,但从电路的本质来说,其组成都有电源、负载、中间环节三个最基本的部分。例如图 1-1 所示的手电筒电路中,电池把化学能转换成电能供给灯泡,灯泡却把电能转换成光能作照明之用。凡是将化学能、机械能等非电能转换成电能的供电设备,称为电源,如干电池、蓄电池和发电机等;凡是将电能转换成热能、光能、机械能等非电能的用电设备,称为负载,如电热炉、白炽灯和电动机等;连接电源和负载的部分,称为中间环节,如导线、开关等。

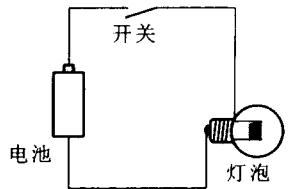


图 1-1 手电筒电路

电路的种类繁多,但从电路的功能来说,主要分为两个方面:其一实现电能的传输和转换(如电力工程,它包括发电、输电、配电、电力拖动、电热、电气照明、以及交、直流电之间的整流和逆变等等。);其二进行信号的传递与处理(如信息工程,它包括语言、文字、音乐、图像的发射和接收、生产过程中的自动调节、各种输入数据的数值处理、信号的存储等等。)。电路的作用不同,对其提出的技术要求也不同,前者较多的侧重于传输效率的提高,后者多侧重于信号在传递过程中的保真、运算的速度和抗干扰等。

2. 理想元件和电路模型

电路的功能虽然只有两个方面,但是实际电路的类型以及工作时发生的物理现象则是千差万别的。我们不可能也没有必要去探讨每一个实际电路,而只需找出它们的普遍规律。为此,我们把实际电路的元件理想化,忽略其次要的因素用以反映它们主要物理性质的理想元件来代替。这样由理想元件组成的电路就是实际电路的电路模型,它是对实际电路物理性质的高度抽象和概括。

用于构成电路的电工、电子元器件或设备统称为实际电路元件,简称实际元件。实际元件的物理性质,从能量转换角度看,有电能的产生、电能的消耗以及电场能量和磁场能量的储存。用

来表征上述物理性质的理想电路元件(今后理想两字常略去)分别称为理想电压源 U_s 、理想电流源 I_s 、电阻元件 R 、电容元件 C 、电感元件 L 。图 1-3 是它们的电路模型图形符号。它们为电路结构的基本模型,由这些基本模型构成电路的整体模型。

例如手电筒电路的电路模型如图 1-2 所示。灯泡看成电阻元件 R_L ,干电池看成理想电压源 U_s 和电阻元件(内阻) R_0 串联。可见电路模型就是实际电路的科学抽象。采用电路模型来分析电路,不仅使计算过程大为简化,而且能更清晰地反映电路的物理实质。

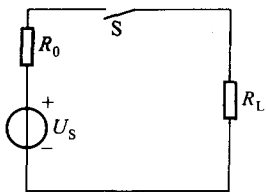


图 1-2 手电筒电路模型

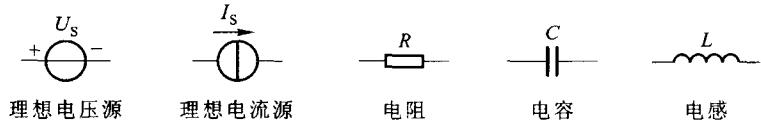


图 1-3 电路的基本模型——理想电路元件

1.1.2 电流、电压的参考方向

电流、电压、电动势的实际方向在物理学中已作过明确的规定:电路中电流的流动方向是指正电荷流动的方向,电路中两点之间电压的方向是高电位(“+”极性)点指向低电位(“-”极性)点的方向(即电位降落的方向),电动势的方向在电源内部由低电位(“-”极性)点指向高电位(“+”极性)点的方向(即电位升高的方向)。图 1-4 所示电路中分别标出了电流、电压、电动势的方向。

但是在分析复杂电路时往往不能预先确定某段电路中电流、电压的实际方向。为了便于分析电路,电路中引出了参考方向的概念。电流、电压的参考方向是人为任意设定的,图 1-5 电路中箭头所示方向就是电流的参考方向。电压的参考方向用极性“+”、“-”号表示。电路中的电流和电压的参考方向可能与实际方向一致或相反,但不论属于哪一种情况,都不会影响电路分析的正确性。

按参考方向求解得出的电流和电压值有两种可能。若为正值,说明设定的参考方向与实际方向一致,若为负值,则表明参考方向与实际方向相反。必须指出,电路中的电流或电压在未标明参考方向的前提下,讨论电流或电压的正、负值是没有意义的。

参考方向也称正方向,除了用箭标和极性标示外,还可以用双下标标示。如图 1-5 中电流 I_3 和电压 U_3 也可以写为 I_{ba} 和 U_{ab} 。

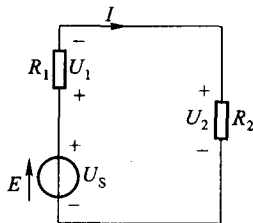


图 1-4 电流、电压的实际方向

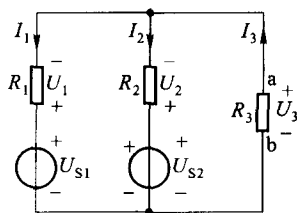


图 1-5 电流、电压的参考方向

当一个元件或一段电路上的电流、电压参考方向一致时,则称它们为关联的参考方向,如图 1-6(a)所示。在分析电路时,尤其是分析电阻、电感、电容等元件的电流、电压关系时,经常采用关联参考方向。例如在应用欧姆定律时必须注意电流、电压的方向,如图 1-6(a)中电流、电压采用了关联参考方向,这时电阻 R 两端电压为

$$U = RI \quad (1-1)$$

若采用非关联参考方向,如图 1-6(b)所示,则电阻 R 两端的电压为

$$U = -RI \quad (1-2)$$

当电阻的单位为欧(Ω)、电流的单位为安(A)时,电压的单位为伏(V)。

例 1-1 应用欧姆定律对图 1-7 的电路列出式子,并求电阻 R 。

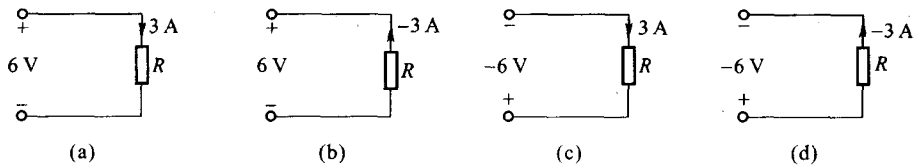


图 1-7 例 1-1 的图

解:图 1-1(a) $R = \frac{U}{I} = \frac{6}{3} = 2 \Omega$

图 1-1(b) $R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-3} = 2 \Omega$

图 1-1(c) $R = -\frac{U}{I} = -\frac{-6}{3} = 2 \Omega$

图 1-1(d) $R = \frac{U}{I} = \frac{-6}{-3} = 2 \Omega$

这里应注意:一个式子中有两套正负号,列写公式时,根据电流和电压的参考方向得出公式中的正负号。此外电流和电压本身还有正值和负值之分。

从物理学中我们已经知道,一个元件上的电功率等于该元件两端的电压与通过该元件电流的乘积,即

$$P = UI$$

当电压的单位为伏(V)、电流的单位为安(A)时,功率的单位为瓦(W)。

元件上的电功率有吸收(取用)和发出(产生)两种可能,用功率计算值的正负来区别,以吸收(取用)功率为正。我们在分析电路时,就列写功率计算公式作如下规定:

(1) 当电流、电压取关联的参考方向时

$$P = UI \quad (1-3)$$

(2) 当电流、电压取非关联参考方向时

$$P = -UI \quad (1-4)$$

在此规定下,将电流 I 和电压 U 数值的正负号如实代入公式,如果计算结果为 $P > 0$ 时,表示元件吸收功率,该元件为负载;反之, $P < 0$ 时,表示元件发出功率,该元件为电源。

例 1-2 图 1-8 所示电路中,已知: $U_{S1} = 15 \text{ V}$, $U_{S2} = 5 \text{ V}$, $R = 5 \Omega$, 试求电流 I 和各元件的功率。

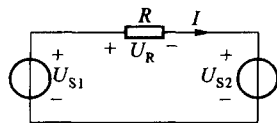


图 1-8 例 1-2 图

解: 由图中电流的参考方向,可得

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R} = \frac{15 - 5}{5} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

电流为正值,说明电流参考方向与实际方向一致。

根据对功率计算的规定,可得

元件 U_{S1} 的功率 $P_{S1} = -U_{S1} I = -15 \times 2 \text{ W} = -30 \text{ W}$ (发出功率)

元件 U_{S2} 的功率 $P_{S2} = U_{S2} I = 5 \times 2 \text{ W} = 10 \text{ W}$ (吸收功率)

元件 R 的功率 $P_R = I^2 R = 2^2 \times 5 \text{ W} = 20 \text{ W}$ (吸收功率)

由本例可看出,电源发出的功率等于各个负载吸收的功率之和,即

$$30 \text{ W} = (10 + 20) \text{ W}$$

按照能量守恒定律,对所有的电路来说,上述结论均成立,称为功率平衡,记为

$$\sum P = 0$$

例 1-3 在图 1-9 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。

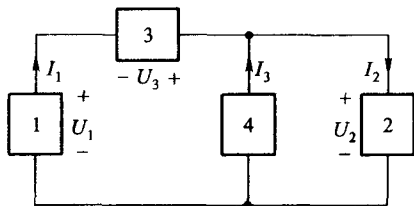


图 1-9 例 1-3 图

解:由功率计算的规定,可得

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

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

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

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

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。

这里仍需注意,在电路分析计算中的两套正负号。列写电路方程时,根据电流和电压的参考方向得出公式中的正负号;代入数据时要如实代入电流和电压数值的正负号。

1.1.3 电路的工作状态

电路在不同的工作条件下,将分别处于通路、开路和短路状态。现以图 1-10 所示电路为例,分别讨论每一种状态的特点。

1. 通路

在图 1-10(a)中,当电源与负载接通时,电路称为通路。电路中的电流,也就是电源的输出电流:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{U_S}{R_0 + R_L} \quad (1-5)$$

式中, R_L 为负载电阻, R_0 为电源的内阻,通常 R_0 很小。负载两端的电压也就是电源输出电压

$$U = E - R_0 I = U_S - R_0 I \quad (1-6)$$

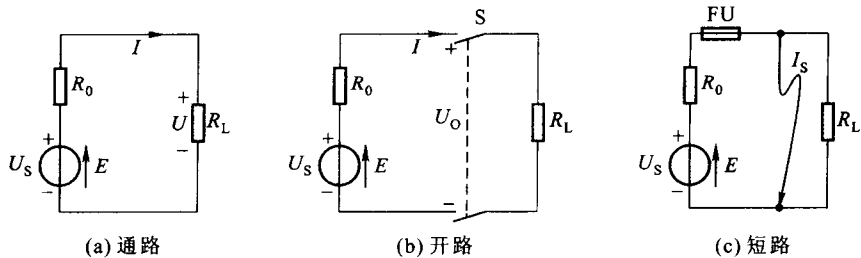


图 1-10 电路的三种状态

通路时的功率平衡关系式为

$$P_{R_L} = P_E - P_{R_0} = EI - R_0 I^2 = UI \quad (1-7)$$

式中 EI 为电源产生的功率; UI 为负载消耗的功率; $R_0 I^2$ 为电源内阻损耗的功率。

通路状态下电路中有了电流和功率的输送和转换。这时电源产生的电功率等于负载消耗的功率与电源内阻损耗的功率之和。由此得出电源输出的电流和功率取决于负载的大小。

电源和负载等电气设备在一定工作条件下其工作能力是一定的。表示电气设备的正常工作条件和工作能力所规定的数据统称电气设备的额定值。它包括额定电压 U_N 、额定电流 I_N 和额定功率 P_N 等等。额定值一般都列入产品说明书中,或直接标明在设备的铭牌上,使用时务必遵守这些规定。如果超过或低于这些额定值,都有可能引起电气设备的损坏或降低使用寿命,或使其不能发挥正常的效能。例如一个标有 1 W 、 $400\ \Omega$ 的电阻,即表示该电阻的阻值为 $400\ \Omega$,额定功率为 1 W ,由 $P = RI^2$ 的关系,可求得它的额定电流为 0.05 A 。使用时电流值超过 0.05 A ,就会使电阻过热,严重时甚至立即损坏。

2. 开路

在图 1-10(b)中,开关打开,电源与负载没有接通,电路称为开路。

由于电路未连成闭合电路,电路中电流为零,电源产生的功率和输出的功率都为零。处于开路状态下的电源两端的电压称为开路电压,用 U_0 表示,其值等于电源的电动势 E (或 U_s)。即

$$U_0 = E = U_s \quad (1-8)$$

3. 短路

在图 1-10(c)中,由于某种原因,电源两端用导线直接连在一起,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

$$I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{U_s}{R_0} \quad (1-9)$$

而电源产生的功率将全部消耗在内阻中,即

$$P_E = EI_s = R_0 I_s^2$$

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,以使短路时,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 有一直流电源设备,额定输出功率为 400 W,额定电压为 110 V,电源内阻 R_0 为 1.38Ω ,当负载电阻分别为 50Ω 、 10Ω 或发生短路事故,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

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

再求电源电动势 E

$$E = U_N + R_0 I_N = (110 + 1.38 \times 3.64) \text{ V} = 115 \text{ V}$$

① 当 $R_L = 50 \Omega$ 时,求电路的电流 I

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{115}{1.38 + 50} \text{ A} = 2.24 \text{ A} < I_N,$$

电源的输出功率 $P_{R_L} = UI = R_L I^2 = 50 \times 2.24^2 \text{ W} = 250.88 \text{ W} < P_N$,电源轻载

② 当 $R_L = 10 \Omega$ 时,求电路的电流 I

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{115}{1.38 + 10} \text{ A} = 10.11 \text{ A} > I_N,$$

电源的输出功率 $P_{R_L} = UI = R_L I^2 = 10 \times 10.11^2 \text{ W} = 1022.12 \text{ W} > P_N$,电源严重过载(不允许)

③ 电路发生短路,求电源的短路电流 I_s

$$I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{115}{1.38} \text{ A} \approx 83.33 \text{ A} \approx 23 I_N$$

如此大的短路电流如不采取保护措施迅速切断电路,电源及导线负载等会被毁坏。

1.1.4 电路中的电位

在分析和计算电路时,特别是在电子技术中,常常将电路中的某一点选作电位参考点,并将参考点的电位规定为零。于是电路中其他任何一点与参考点之间的电压便是该点的电位。在电力工程中规定大地为电位的参考点,在电子电路中,通常以与机壳联接的输入、输出的公共导线为参考点,称之为“地”,在电路图中用符号“ \perp ”表示。

图 1-11(a)所示电路选择了 e 点为参考点,这时各点的电位是

$$\begin{aligned} U_c &= 0 \text{ V}, U_a = U_{ac} = 10 \text{ V}, U_d = U_{de} = -5 \text{ V} \\ U_b &= U_{bd} + U_{de} = (5 + 6)I + U_d \\ &= \left[(5 + 6) \frac{(10 + 5)}{(4 + 5 + 6)} + (-5) \right] \text{ V} = 6 \text{ V} \end{aligned}$$

$$U_c = U_{cd} + U_{de} = 6I + U_d = [6 + (-5)] \text{ V} = 1 \text{ V}$$

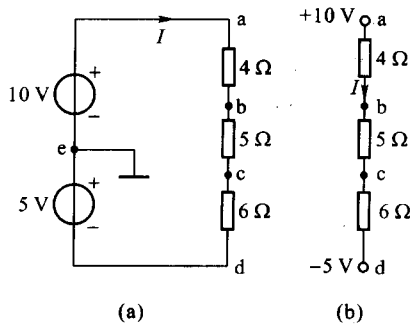


图 1-11 电路的电位

原则上,参考点可以任意选择,但是参考点不同,各点的电位值就不一样,只有参考点选定之后,电路中各点的电位值才能确定,例如图 1-11(a)所示电路,如果将参考点选定为 d 点,则各点的电位将是

$$U_d = 0 \text{ V}, U_a = 15 \text{ V}, U_b = 11 \text{ V}, U_c = 6 \text{ V}, U_e = 5 \text{ V}$$

因此可见,电路中电位的大小、极性和参考点的选择有关,而电压的大小、极性则和参考点的选择无关。并且两点之间的电压总是等于这两点间的电位之差。如 $U_{ab} = U_a - U_b$

在电子电路中,电源的一端通常都是接“地”的,为了作图简便和图面清晰,习惯上常常不画出电源来,而在电源的非接地的一端注明其电位的数值。例如图 1-11(b)就是图 1-11(a)的习惯画法,图中正的电位值表示该端接正电源,即电源的正极接该端,负极接“地”。反之为负电源。图 1-12 为电子电路的习惯画法。

在分析计算电路时应注意:参考点一旦选定之后,在电路分析计算过程中不得再更改。

例 1-5 电路如图 1-13 所示,试求 B 点的电位及电压 U_{AB} 。

解:图中两个电阻串联,其电流相同。因此,可得

$$\begin{aligned} \frac{U_A - U_B}{R_1} &= \frac{U_B - U_C}{R_2} \\ \frac{+12 - U_B}{5} &= \frac{U_B - (-6)}{4} \end{aligned}$$

求得:

$$U_B = 2 \text{ V}, U_{AB} = U_A - U_B = (12 - 2)\text{V} = 10 \text{ V}$$

例 1-6 试求图 1-14 电路中,当开关 S 断开和闭合两种情况下 A 点的电位 U_A 。

解: ① 当开关 S 断开时,三个电阻中为同一电流。因此可得

$$\frac{-12 - U_A}{(6 + 4)} = \frac{U_A - 12}{20},$$

求得: $U_A = -4 \text{ V}$

② 当开关 S 闭合时, $U_B = 0$, $4 \text{ k}\Omega$ 和 $20 \text{ k}\Omega$ 电阻为同一电流。因此可得

$$\frac{U_A}{4} = \frac{12 - U_A}{20},$$

求得: $U_A = 2 \text{ V}$

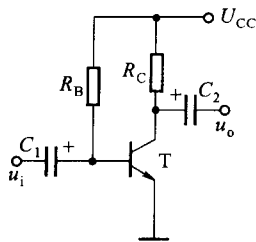


图 1-12 电子电路的习惯画法

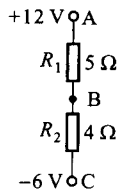


图 1-13 例 1-5 图

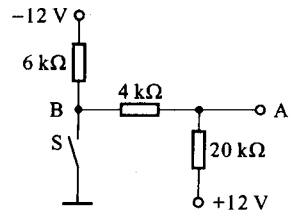


图 1-14 例 1-6 图

1.2 电路的基本元件

本节介绍电路的基本元件。从电路分析的角度看,我们最感兴趣的是元件的外部特性,而其中最主要的就是元件端钮上的伏安关系和能量关系。

1.2.1 独立电源元件

能向电路独立地提供电压、电流的装置称为独立电源。如发电机、干电池、蓄电池、稳压电源、稳流电源等。我们先介绍两个理想电源元件——理想电压源、理想电流源,然后说明如何建立实际电源的两种电路模型。

1. 理想电压源和理想电流源

理想电压源和理想电流源都是理想的电源元件,它们的外特性 $U = f(I)$ 和图形符号分别如图 1-15(a)、(b) 和图 1-16(a)、(b) 所示。

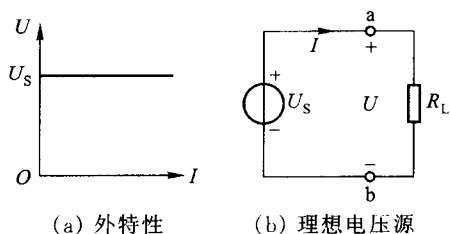


图 1-15 理想电压源外特性与符号

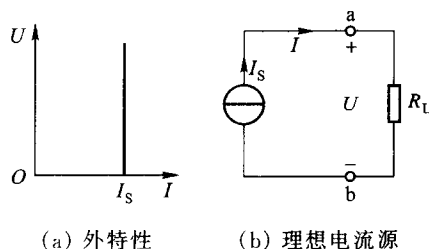


图 1-16 理想电流源外特性与符号

理想电压源能提供一个恒定值的电压 U_s 。当外接负载电阻 R_L 变化时,流过理想电压源的电流将发生变化,但电压 U_s 不变。因此理想电压源有两个特点,其一是任何时刻输出电压都和流过的电流大小无关;其二是输出电流取决于外电路,由外部负载电阻决定。

理想电流源能提供一个恒定值的电流 I_s 。当外接负载电阻 R_L 变化时,理想电流源两端的电压将发生变化,但电流 I_s 不变。因此理想电流源有两个特点,其一是任何时刻输出电流都和它的端电压大小无关;其二是输出电压取决于外电路,由外部负载电阻决定。

2. 实际电源的两种电路模型

在对电路进行分析时,使用的实际电源通常可以用两种不同的模型来表示,这两种模型分别称为电源的电压源模型(简称电压源)和电流源模型(简称电流源),它们用理想电源元件和理想电阻元件的组合来表征实际电源的特性。图 1-17(a)、(b) 和图 1-18(a)、(b) 分别表示了它们的外特性及电路模型。

电压源输出电压与电流之间的关系式为

$$U = U_s - R_0 I \quad (1-10)$$

式中 U 为电压源的输出电压; U_s 为理想电压源的电压; I 为电压源的输出电流; R_0 为电压源的内阻。电压源的内阻愈小,输出电压就愈接近理想电压源的电压 U_s , 当内阻 $R_0 = 0$ 时电压源就

是理想电压源。

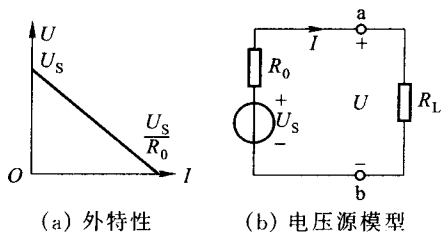


图 1-17 电压源外特性和模型

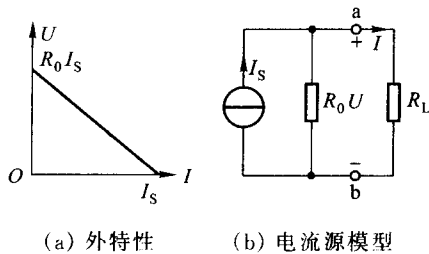


图 1-18 电流源外特性和模型

电流源输出电流与电压之间的关系式为

$$I = I_s - \frac{U}{R_0} \quad (1-11)$$

式中 I 为电流源的输出电流； I_s 为理想电流源的电流； U 为电流源的输出电压； R_0 为电流源的内阻。电流源的内阻愈大，输出电流就愈接近理想电流源的电流 I_s ，当内阻 $R_0 = \infty$ 时电流源就是理想电流源。

3. 实际电源两种模型的等效变换

电压源、电流源都是一个实际电源的电路模型，无论采用哪一种模型，在相同外接负载电阻的情况下，其输出电压、电流均和实际电源输出的电压、电流相等（外特性相同）。即两种电源对负载（或外电路）而言，相互间是等效的，可以等效变换（图 1-19）。其中

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \text{ 或 } U_s = R_0 I_s \quad (1-12)$$

变换时应注意极性， I_s 的流出端要对应 U_s 的“+”极。另外， R_0 不一定必须是电源的内阻。只要是与理想电压源串联的电阻，或者与理想电流源并联的电阻，都可以当 R_0 处理。

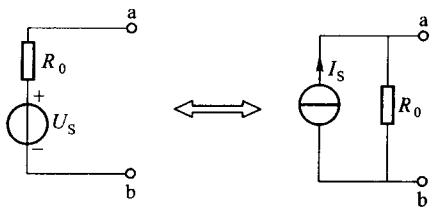


图 1-19 电压源和电流源的等效变换

必须注意：电压源与电流源的等效变换只是对外电路而言的；理想电压源与理想电流源间没有等效关系。

采用实际电源两种模型的等效变换方法，可将较复杂电路简化为简单电路，给电路分析带来方便。

例 1-7 试用电压源模型与电流源模型的等效变换的方法，计算图 1-20(a) 中 1Ω 电阻上的电流 I 。