



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电路与模拟电子技术

(第二版) (配光盘)

■ 殷瑞祥 主编



高等教育出版社
Higher Education Press



内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

电路与模拟电子技术是计算机类专业的一门理论性、实践性都比较强的技术基础课程,全书包括三个部分:电路理论基础、模拟电子技术基础和电路与模拟电子技术实验。书中着重基本概念、基本原理和基本电路的分析与应用。例题和习题除围绕上述重点外,还注意思考性、启发性,使读者能增强分析问题和解决问题的能力。实验内容,提供了16项电路与模拟电子技术实验。

为提高读者应用计算机辅助手段分析设计电子电路的能力,附录介绍了利用EWB进行电子电路分析设计的方法。

本书兼顾了深度和广度,适合计算机类专业及相关专业学科本、专科学生使用,也可作为各种成人教育的教材。本书对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

(盘光驱) (第二册)

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/殷瑞祥主编. —2版. —北京:高等教育出版社, 2009.6

ISBN 978-7-04-026453-1

I. 电… II. 殷… III. ①电路理论-高等学校-教材
②模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TM13 TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第053329号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市鑫霸印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 23.25
字 数 570 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2003年12月第1版
2009年6月第2版
印 次 2009年6月第1次印刷
定 价 32.40元(含光盘)

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
物料号 26453-00

Higher Education Press

第二版前言

本书第一版 2003 年 12 月出版至今已经 5 年，这 5 年正是我国高等学校深化教学改革如火如荼的 5 年，本课程经历了新一轮改革，遇到许多新问题，在教学内容与教学要求上提出新的要求。面对教学需要，我们对教材进行了较大篇幅的修订。

首先，为应对电子技术教学内容不断扩大的要求，在教材中压缩了电路部分内容，增强了电子技术应用的内容。根据电路分析基础的规律，按照分析方法的归类，将第一版中涉及正弦稳态分析的三章内容精简合并成一章；第 2 章增加电路分析的网孔分析方法；将第一版第 7 章分成两章，半导体器件基础与二极管电路单列一章，增加了二极管应用电路的介绍；直流电源放到第 9 章，加深了串联型稳压电源和开关稳压电源的内容，便于内容的衔接；晶体管放大电路基础一章增加了频率特性内容；集成运算放大器及其应用改名为模拟集成电路及其应用电路，增加了集成运算放大器核心单元电路——差分放大电路和镜像电流源偏置电路，增加集成功率放大器及其应用电路内容；信号产生电路一章增加石英晶体正弦波振荡电路内容，充实了非正弦振荡电路的定量分析；实验部分增加了 4 项实验内容。

其次，考虑到 EDA 技术应用已经比较普遍，将第一版第 12 章的内容归并到附录，不再单列一章；A/D 和 D/A 转换内容作为附录放到书末，不单列一章。

本书修订中还更新和补充了各章思考题与习题。

第二版书稿承蒙清华大学王鸿明教授主审，王教授对全书修订内容布局、内容组织和文字叙述提出了很好的建议，并为书稿纠正了错误，在此向王教授表示由衷的感谢。

感谢使用本书第一版的全国高校教师给我们反馈的修改建议，感谢西安交通大学刘晔副教授提供的书面修订建议，感谢四川大学雷勇教授提供的修订意见。高等教育出版社为本书修订做了大量工作，作者深表感谢。

限于作者水平，书中存留错漏，欢迎使用本书的教师和广大读者批评指正。

殷瑞祥

2009 年 1 月于广州

第一版前言

本书是针对计算机类专业编写的电工电子基础教材，与电气电子类专业不同，对于计算机类专业学生既要比较熟练地掌握电工电子技术的方法和应用，又不要求作深入的研究；但也不同于一般非电类专业只要求了解电工电子技术的概念，它对分析与设计都有一定的要求，以便掌握计算机相关硬件知识和从事计算机接口电路的分析与设计，对于电机及其控制则一般不做要求。因此，计算机类专业在实施专业教学的过程中，既不能按照电类专业那样设置多门课程进行电工电子基础教学，又难以套用非电类专业采用电工学教材的模式开展教学。国内大多数高等学校计算机类专业培养计划的课程设置都是将电路基础和模拟电子技术合并设立一门课程，后续安排数字电路（部分学校对硬件要求不高的也可不设）和数字逻辑课程来完成电工电子基础教学，本书正是在这样的背景下为满足教学需要，在多年教学基础上整理编写的。

在内容组织上，考虑到后续课程的差异，我们单独设立一章介绍 A/D、D/A 转换，使模拟电子电路与数字电子电路能够衔接，对于不设立数字电路课程的专业，可在数字逻辑课程中简单介绍逻辑单元功能电路（逻辑门、触发器）。

随着电工电子技术的发展，各种计算机辅助分析、设计手段越来越完善，因此，我们除了介绍电子电路基本分析设计思路，还专门设一章介绍应用 EWB 进行电子电路分析与设计的方法。

本书 1~6 章为电路基础内容，主要介绍基本的电路理论和分析方法，着重电路的分析方法阐述，7~11 章为模拟电子技术内容，以应用电路来组织内容，着重介绍应用电路的分析和设计，第 12 章介绍 EDA 技术，第 13 章安排了 12 个电路与模拟电子技术实验，由于各个学校实验室情况不同，因此，没有在实验中规定设备，以满足不同的需求。

在编写过程中，编者认真总结多年教学经验，学习参考了国内外同类和相关教材及著作。本教材以培养学生分析问题和解决问题能力，提高学生素质为目标，注重基本概念、基本原理、基本方法的论述，既能使学生掌握好基础，又能启发学生思考、开阔视野。文字叙述力求简明扼要，便于自学。

本书的编写大纲是在华南理工大学电工教研室全体教师集体讨论的基础上制订的，华南理工大学电工教研室的罗昭智老师、朱宁西老师、丘晓华老师、樊利民老师和张琳老师参与了教材的部分编写工作。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

殷瑞祥

2003 年 8 月于广州

目 录

上篇 电路理论基础

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

1.1 电路组成与功能	3
1.2 电路模型	4
1.3 电路中的基本物理量：电压、电流、 电位、功率	5
1.3.1 电流	5
1.3.2 电压、电位和电动势	6
1.3.3 功率和能量	7
1.4 基本电路元件模型	9
1.4.1 电阻元件	9
1.4.2 电容元件	10
1.4.3 电感元件	12
1.4.4 有源电路元件	13
1.5 电路的工作状态与元件额定值	15
1.5.1 电路的工作状态	15
1.5.2 电气设备的额定值	16
1.6 基尔霍夫定律	18
1.6.1 基尔霍夫电流定律	18
1.6.2 基尔霍夫电压定律	19
思考题与习题	21

第 2 章 电路分析的基本方法

2.1 等效电路分析法	25
2.1.1 等效电路的概念	25
2.1.2 电阻的串联和并联等效	26
2.1.3 理想电压源、电流源的串联和 并联	29
2.1.4 电源模型的等效变换	31
2.2 支路电流分析法	34
2.3 网孔电流分析法	35
2.4 结点电压分析法	37
2.4.1 结点电压的概念	37
2.4.2 结点电压方程	37

2.4.3 由观察法快速建立结点电压 方程	38
2.5 电路定理	40
2.5.1 叠加定理	40
2.5.2 替代定理	41
2.5.3 等效电源定理	43
2.5.4 最大功率传输定理	47
思考题与习题	49

第 3 章 交流稳态电路分析

3.1 正弦量的基本概念	54
3.1.1 周期和频率	55
3.1.2 幅值和有效值	55
3.1.3 相位和相位差	56
3.2 正弦量的相量表示法及相量图	58
3.3 单一频率正弦稳态电路分析	60
3.3.1 元件的相量模型	60
3.3.2 电路的相量模型	63
3.3.3 基尔霍夫定律的相量形式	63
3.3.4 阻抗和导纳	63
3.3.5 阻抗的串联和并联	64
3.3.6 正弦稳态电路的一般分析	66
3.4 正弦稳态电路的功率及功率因数的 提高	69
3.4.1 正弦稳态电路的功率	69
3.4.2 功率因数的提高	73
3.5 正弦稳态电路中的谐振	75
3.5.1 串联谐振	75
3.5.2 并联谐振	77
3.6 三相交流电路	79
3.6.1 三相电源	79
3.6.2 负载星形联结的三相电路	80
3.6.3 负载三角形联结的三相电路	82
3.6.4 三相负载的功率	84

3.7 非正弦周期交流稳态电路	85	4.2.1 RC 电路的零状态响应	105
3.7.1 非正弦周期电压、电流的谐波 分解	86	4.2.2 RC 电路的零输入响应	107
3.7.2 非正弦周期交流电路的谐波 分析方法	88	4.2.3 RC 电路的全响应	109
3.7.3 非正弦周期量的有效值	89	4.3 RL 电路的暂态过程	110
3.7.4 非正弦周期交流电路的计算	89	4.3.1 RL 电路的零状态响应	110
3.7.5 非正弦周期交流电路的功率	92	4.3.2 RL 电路的零输入响应	111
思考题与习题	93	4.3.3 RL 电路的全响应	113
第4章 暂态电路分析	100	4.4 一阶线性电路暂态过程的三要素 分析法	114
4.1 换路定律与电压、电流初始值的 确定	100	4.5 矩形脉冲作用于—阶电路	117
4.1.1 换路定律	101	4.5.1 微分电路	119
4.1.2 初始值计算	101	4.5.2 积分电路	120
4.2 RC 电路的暂态过程	105	4.5.3 耦合电路	121
		4.6 RLC 串联电路的零输入响应	122
		思考题与习题	126
中篇 模拟电子技术基础			
第5章 半导体器件基础与二极管电路	133	6.2.2 晶体管电流分配及放大原理	156
5.1 半导体二极管的工作原理与特性	133	6.2.3 晶体管的特性曲线	158
5.1.1 PN 结及其单向导电性	133	6.2.4 晶体管的主要参数	159
5.1.2 半导体二极管的基本结构	136	6.2.5 晶体管的大信号电路模型	161
5.1.3 半导体二极管的伏安特性及主要 参数	137	6.3 双极型晶体三极管放大电路	162
5.1.4 稳压二极管	139	6.3.1 共发射极放大电路	162
5.2 二极管整流电路	141	6.3.2 放大电路的基本分析方法	165
5.2.1 单相半波整流电路	141	6.3.3 静态工作点稳定电路	173
5.2.2 单相桥式整流电路	142	6.3.4 射极输出器	178
5.2.3 三相桥式整流电路	144	6.4 场效应晶体三极管	181
5.3 二极管峰值采样电路	145	6.4.1 绝缘栅场效应管	181
5.4 二极管检波电路	146	6.4.2 结型场效应管(JFET)	185
5.4.1 二极管小信号平方律检波 电路	146	6.4.3 场效应管的主要参数	187
5.4.2 二极管大信号包络检波电路	148	6.5 场效应管放大电路	188
思考题与习题	149	6.5.1 场效应管放大电路静态工作点的 设置及分析	188
第6章 晶体管放大电路基础	152	6.5.2 场效应管放大电路的动态 分析	190
6.1 放大电路的基本概念	152	6.5.3 场效应管放大与晶体管放大的 比较	194
6.1.1 线性受控电源模型	152	6.6 多级放大电路	194
6.1.2 放大电路模型及技术指标	153	6.6.1 阻容耦合放大电路	194
6.2 双极型晶体三极管及其电路模型	155	6.6.2 直接耦合放大电路	197
6.2.1 晶体管基本结构	155	6.7 功率放大电路	200

6.7.1 功率放大电路的特点	200	7.5.1 LM386 集成功率放大器	253
6.7.2 互补对称功率放大电路	201	7.5.2 LM386 的典型应用	254
6.8 放大电路的频率特性	205	思考题与习题	256
6.9 放大电路中的负反馈	208	第8章 信号产生电路	263
6.9.1 什么是放大电路中的负反馈	208	8.1 正弦信号产生电路	263
6.9.2 负反馈的类型及判别	209	8.1.1 正弦波振荡电路的基本原理	263
6.9.3 负反馈对放大电路工作性能的影响	215	8.1.2 LC 振荡电路	266
思考题与习题	219	8.1.3 RC 振荡电路	270
第7章 模拟集成电路及其应用电路	226	8.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	272
7.1 集成运算放大器概述	226	8.2 非正弦信号产生电路	274
7.1.1 集成运算放大器的组成及特点	227	8.2.1 矩形波发生器	274
7.1.2 集成运算放大器的电压传输特性和等效电路模型	228	8.2.2 三角波和锯齿波发生器	276
7.1.3 集成运算放大器的理想化	228	8.3 集成函数发生器 8038 及其应用	278
7.1.4 常用的集成运算放大器及其主要参数	229	8.3.1 集成函数发生器 8038 的电路结构及其功能	278
7.2 集成运算放大器中的内部单元电路	231	8.3.2 集成函数发生器 8038 的典型应用	279
7.2.1 差分放大电路	232	思考题与习题	280
7.2.2 镜像电流源偏置电路	236	第9章 直流电源	283
7.3 集成运算放大器的线性应用	239	9.1 整流滤波电路	284
7.3.1 比例运算电路	239	9.1.1 整流电路	284
7.3.2 加法、减法运算电路	241	9.1.2 滤波电路	285
7.3.3 微分、积分运算电路	244	9.2 稳压二极管稳压电源	290
7.3.4 有源滤波器	247	9.3 串联型线性稳压电源	293
7.4 集成运算放大器的非线性应用	249	9.4 集成稳压电路	295
7.4.1 比较器	249	9.5 开关型稳压电源	298
7.4.2 采样保持电路	252	9.5.1 串联型开关稳压电路	298
7.5 模拟集成功率放大器及其应用	253	9.5.2 并联型开关稳压电路	300
		思考题与习题	301

下篇 电路与模拟电子技术实验

第10章 电路与模拟电子技术实验	309	10.9 差分放大电路	323
10.1 感性负载电路及功率因数的提高	309	10.10 集成运算放大器线性应用电路设计	323
10.2 三相电路	310	10.11 集成功率放大器	324
10.3 RLC 电路的频率特性	312	10.12 RC 振荡器电路设计	328
10.4 RC 一阶电路暂态过程研究	314	10.13 信号发生电路设计	329
10.5 低频单管电压放大器	317	10.14 硅稳压二极管稳压电源	330
10.6 低频功率放大电路的测试	319	10.15 串联型直流稳压电源	331
10.7 场效应管放大电路设计	321	10.16 集成稳压电源	333
10.8 多级放大电路设计	322		

附录	335
附录 1 模拟量和数字量的转换	335
附 1.1 数模(D/A)转换器	335
附 1.2 模数(A/D)转换器	339
附录 2 应用 EWB 进行电子电路分析设计	345
附 2.1 Multisim 的操作界面	345
附 2.2 利用 Multisim 进行电路仿真分析	346
附 2.3 直流工作点分析(DC Operating Point Analysis)	347
附 2.4 交流分析(AC Analysis)	348
附 2.5 瞬态分析(Transient Analysis)	349
附 2.6 直流扫描分析(DC Sweep Analysis)	350
附 2.7 DC 和 AC 灵敏度分析(Sensitivity Analysis)	351
附 2.8 参数扫描分析(Parameter Sweep Analysis)	352
附 2.9 分析举例	353
参考文献	361

附录 A 电子元器件的符号表示

A.1 电阻	361
A.2 电容	361
A.3 电感	361
A.4 二极管	361
A.5 三极管	361
A.6 集成运放	361
A.7 逻辑门	361
A.8 继电器	361
A.9 其他符号	361

上 篇

电路理论基础

第 1 章

电路的基本概念与基本定律

本章在物理学的基础上,主要介绍电路模型的概念、电路中的基本物理量及其参考方向和电路的工作状态,还将介绍基本电路元件及其特性,最后介绍集中参数电路的拓扑约束关系——基尔霍夫定律。这些内容是分析和计算电路的基础。

本章所涉及的内容在中学物理课程和大学物理课程中大多曾经介绍过,在本课程中对这些概念的重新叙述,需要在电路分析的层面上加强工程应用意识,这也是本课程与物理学的本质差异,学习中必须注意。本章内容中初学者需要深刻理解电路中电压和电流的参考极性和参考方向的意义,强化电路模型的概念,牢固掌握集中参数电路的基本约束关系——基尔霍夫定律和元件伏安特性约束。

1.1 电路组成与功能

在日常工作和生活中,为完成某种预期的目的,常常需要设计、安装各式各样的功能电路。所谓电路,就是按所要完成的功能,将一些电气设备或元器件按一定方式连接而成,以备电流通过的通路。如果电路工作时其中电流的大小和方向不随时间变化,称为直流电路;如果电路工作时其中的电流是随时间按正弦规律变化的交流电流时,则称为正弦交流电路。

图 1-1-1 是一个手电筒电路,电池是整个电路的电源,它发出电能(将化学能转换成电能);电珠是负载,它消耗电能(将电能转换成光能和热能);电源和负载由导线和开关连接成一个闭合回路。

图 1-1-2 是一个扩音机的电路示意图,该电路实现了信号的传递和处理。首先由话筒把声音转换成相应的电压和电流,即电信号,然后通过电路传递到扬声器,最后由扬声器再将电信号还原成为声音。由于话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发声,因此中间还需要用放大器来对信号进行放大(实际上,放大器需要另外的直流电源供电,在放大器中,直流电

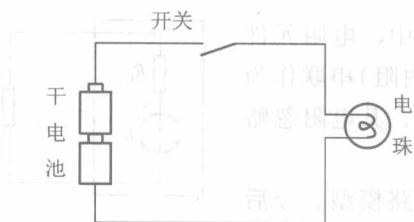


图 1-1-1 手电筒电路



图 1-1-2 扩音机示意图

源提供的能量被转换为信号能量。由于我们在考虑信号处理的过程中,主要关注信号的变化,因此,给放大器供电的直流电源没有特别画出)。在此例中,话筒是输出信号的设备,称为信号源,相当于电源,但它与电池、发电机等电源不同,信号源输出的电信号(电压或电流)的变化规律取决于所加的信息(如此例中的声音)。

电路的种类很多,但无论电路的复杂程度如何,它都由三大部分组成:

电源(或信号源): 电源是将其他形式的能量转换成电能的电气设备。例如把化学能转换成电能的电池、把机械能转换成电能的发电机、将声音转换成电信号的话筒等。

负载: 负载是将电能转换成其他形式能量的电气设备。如将电能转换成光能的白炽灯,将电能转换成声能的扬声器,将电能转换成机械能的电动机等。

中间环节: 中间环节是连接电源(或信号源)和负载的元件或部件。例如导线、开关、熔断器、放大器等。

实际电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的,但按其功能可以分为两大类:

一是进行电能的传输和转换(如电力系统,手电筒电路等),这类电路主要关注的是能量传输和转换的效率。

二是进行信号的传递和处理(如扩音机电路,收音机,电视机等),这类电路主要关注信号传输和处理质量,如保真度。

1.2 电路模型

实际电路都是由起特定作用的元件或器件连接组成的,如电池、灯泡、发电机、变压器、话筒、扬声器等。这些实际元器件的电磁性能一般较为复杂,要完全把它们电磁性能描述出来是比较困难的,但每一种实际电路元器件都具有一个占主要作用的特性。例如白炽灯,它除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,当电流通过时也会产生磁场,即它具有电感性,但由于它的电感很微小,可以忽略不计,所以电阻特性是白炽灯的主要电磁特性。

上述实际电路的示意图画出了组成电路的元器件的实物。为了便于对实际电路进行分析计算,将实际电路元件理想化(或称为模型化),即在一定条件下只考虑元器件的主要电磁性能,而忽略其次要因素,把它近似地看成理想电路元件。由理想电路元件所组成的电路,称为实际电路的电路模型。

理想电路元件是组成电路模型的最小单元,是具有某种确定的电磁性质的假想元件,它是具有精确的数学定义的一种理想化的模型。

图1-2-1所示为手电筒电路的电路模型。在该图中,电阻元件 R 是电珠的电路模型,电压源 E 和电阻 R_0 (称为电源的内阻)串联作为干电池的模型,连接导线(包括开关)均用理想导线表示,其电阻忽略不计。

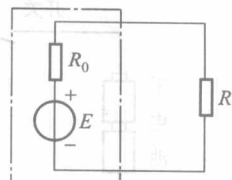


图1-2-1 手电筒电路的电路模型

本书所讨论的电路均不是实际电路,而是它们的电路模型。今后本书所说电路一般均指由理想电路元件构成的电路模型,并将理想电路元件简称为电路元件。

1.3 电路中的基本物理量：电压、电流、电位、功率

1.3.1 电流

电流是由电荷(带电粒子)有规则的定向运动而形成的,在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。

设在时间 dt 内通过导体横截面 A 的电荷量为 dq , 则电流 i 定义为

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

如果电流不随时间变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$, 则这种电流称为直流电流。直流电流用大写字母 I 表示,因此,上式可以写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-3-2)$$

式中 q 是时间 t 内流过导体横截面 A 的电荷量。

本书以后均用大写字母表示恒定不变的直流量,用小写字母表示随时间变化的交流量。

习惯上规定,正电荷移动的方向为电流的方向(即实际方向)。电流的方向是客观存在的,当一个电路的元件参数和电路结构确定以后,流过各元件的电流大小和方向也就确定了。但在电路分析尤其是复杂电路的分析中,事先往往很难判断电路中各处电流的实际方向,而且电路中电流的方向还可能是随时间变化的(如交流电路)。但不论怎样,电路中各处电流只具有两个可能的方向,为了分析与计算方便,任意选择其中一个方向作为电流的正方向,称为参考方向,即可将电路中具有方向的物理量电流用代数量表示。

参考方向并不一定与实际方向相同,当电流的实际方向与其参考方向相同时,则电流为正值;反之,当电流的实际方向与参考方向相反时,则电流为负值,只有在选定了参考方向以后,电流的值才有正负之分。由于电流的参考方向影响着电流的正负,因此,在电路分析过程中,一旦选定了电流的参考方向,将不宜再进行重新选择(即每个电流的参考方向原则上只能选择一次)。

图 1-3-1 所示为一个电路的一部分,流过电阻 R 的电流为 I , 其实际方向是由 A 到 B (如虚线箭头所示)。左图中指定参考方向为由 A 到 B (如实线箭头所示), 电流 I 参考方向与实际方向相同, $I > 0$; 右图中选择电流参考方向为由 B 到 A (如实线箭头所示), 参考方向与实际方向相反, $I < 0$ 。

值得注意的是,电路中电流的参考方向是为对电路进行数学分析而人为设定的,具有任意性,但是,合理的设置电流参考方向可以给电路的分析带来便利,在电路分析中一般用箭头表



图 1-3-1 电流的参考方向

示电流参考方向,也可用双下标表示,例如 I_{AB} 表示参考方向是由 A 指向 B。

电流是国际单位制(SI)中的基本物理量,单位是安培(A)。电子电路中用安培计量电流显得太大,常以毫安($1\text{ mA} = 10^{-3}\text{ A}$)或微安($1\text{ }\mu\text{A} = 10^{-6}\text{ A}$)为计量单位。

1.3.2 电压、电位和电动势

电路中某点的电位(或称电势)是单位正电荷在该点所具有的电位(势)能,数值上等于电场力将单位正电荷沿任意路径从该点移动到参考点所做的功。a 点的电位记为 V_a 。

电路中两点间的电位差称为电压,数值上等于电场力把单位正电荷从起点移到终点所做的功,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3-3)$$

式中 V_a 为 a 点的电位, V_b 为 b 点的电位, U_{ab} 为 a、b 间的电压。

电压的极性规定为从高电位点指向低电位点,即电位降的方向。与电流类似,在比较复杂的电路中,两点间电压的实际极性往往很难预测,出于同样的考虑,在分析电路前对电压选择一个参考极性,从而将带有极性的物理量电压用代数值描述。如果参考极性与实际极性相同,电压为正;如果参考极性与实际极性相反,则电压为负。电压的参考极性一般用“+”、“-”表示,用“+”号表示参考极性的高电位点,而用“-”号表示参考极性的低电位点,也可采用箭头(“+”极指向“-”极)或双下标来表示电压的参考极性。

电路中同一元件的电压和电流都存在设定参考极性和参考方向的问题,为了分析的方便,常取一致的参考方向,称为关联参考方向。即,在同一电路元件上,电流的参考方向从电压参考极性的“+”极指向“-”极。这样,在一个元件上只要设定一个参考方向(电压或电流),另一个就自然确定了,今后如果未加特别声明,都将采用关联的参考方向。

电路中任意一点的电位,就是该点与参考点之间的电压,这就是电压与电位两者之间的联系,它们本质上都是功和能的概念。但电位与电压又是有区别的:电位数值依赖于参考点的选择,规定参考点的电位为零,电路中某点的电位会因所选参考点不同而不同;而电压却与参考点的选择无关。

在国际单位制(SI)中,电压、电位的单位均为伏特(V)。

例 1-3-1 如图 1-3-2 所示,已知:电压源 $U_1 = 3\text{ V}$, $U_2 = 6\text{ V}$ 。在下列两种情况下求各点电位以及 U_{ab} 和 U_{bc} :

(1) 取 a 为参考点,如图 1-3-2(a) 所示;

(2) 取 b 为参考点,如图 1-3-2(b) 所示。

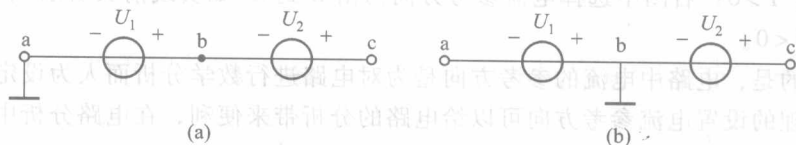


图 1-3-2 例 1-3-1 的图

解: (1) 取 a 为参考点,如图 1-3-2(a), 由图可得

$$V_a = 0 \text{ V}, V_b = U_1 = 3 \text{ V}, V_c = U_1 + U_2 = (3 + 6) \text{ V} = 9 \text{ V}$$

$$U_{ab} = V_a - V_b = (0 - 3) \text{ V} = -3 \text{ V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = (3 - 9) \text{ V} = -6 \text{ V}$$

(2) 取 b 为参考点, 如图 1-3-2(b), 由图可得

$$V_a = -U_1 = -3 \text{ V}, V_b = 0 \text{ V}, V_c = U_2 = 6 \text{ V}$$

$$U_{ab} = V_a - V_b = (-3 - 0) \text{ V} = -3 \text{ V}$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = (0 - 6) \text{ V} = -6 \text{ V}$$

由此可见, 电位与参考点的选取有关, 参考点不同, 各点电位不同; 而电压与参考点的选取无关, 参考点不同, 两点之间的电压不变, 但电压的参考极性不同, 则符号不同。

原则上参考点可以任意选取, 但在电工技术中, 通常选大地为参考点, 在电路中用符号“⊥”表示; 在电子技术中则选公共点或机壳作为参考点, 电路中用符号“⊥”表示。

电动势是对电源中非电场力做功(转变成电能)能力的表述, 数值上等于非电场力克服电场力把单位正电荷从电源负极移动到正极所作的功, 因此电动势的方向从电源负极指向正极, 即电源电位升的方向。电动势用 E (或 e) 表示, 如图 1-3-3 所示, $U_{ab} = E$ 。电路分析中与电压、电流一样, 事先也给电源电动势规定一个参考方向。

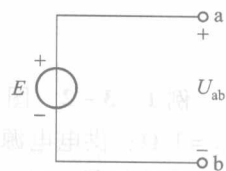


图 1-3-3 电动势及其参考方向

在国际单位制(SI)中电动势的单位也是伏特(V)。

1.3.3 功率和能量

电荷流经电路中的元件, 其电位发生变化, 说明电场力对电荷做功, 这部分能量被认为由该元件从电路中吸收。从 t_0 到 t_1 这段时间内, 某元件吸收的电能可从电压的定义中求得

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t_1)} u dq$$

因为 $i = \frac{dq}{dt}$, 所以, 在关联参考方向下

$$W = \int_{t_0}^{t_1} u i dt \quad (1-3-4)$$

对于直流电路, 电压、电流均为恒定值, 则

$$W = UI(t_1 - t_0) \quad (1-3-5)$$

电路中功率定义为单位时间内消耗的电能, 即电路吸收能量对时间的导数, 结合电路中电压电流的参考方向, 电路中功率的计算可以表示为

$$P = \frac{dW}{dt} = \begin{cases} ui & \text{关联参考方向} \\ -ui & \text{非关联参考方向} \end{cases} \quad (1-3-6)$$

在直流电路中 $P = UI$ (关联) 或 $P = -UI$ (非关联)。

值得注意的是, 采用非关联参考方向时, 计算电路功率需要在公式中增加一个负号。由于考虑的功率是电路中元件消耗(吸收)电能的速度, 因此, 当 $P > 0$ 时, 表示元件吸收功率, 是负载; 当 $P < 0$ 时, 元件发出功率, 是电源。

在国际单位制中, 能量 W 的单位为焦耳(J), 功率 P 的单位为瓦特(W)。若时间单位为小时(h), 功率以千瓦(kW)为单位, 则电能的单位为千瓦时(kW·h), 也称“度”, 这是供电部门度量用电量的常用单位。

如图 1-3-4 所示, 已知某元件两端电压为 5 V, A 点电位高于 B 点电位, 流过元件的电流为 2 A, 实际方向为从 A 到 B。若电压和电流采用关联参考方向如图 1-3-4(a) 所示, 则 $U=5\text{ V}$, $I=2\text{ A}$, $P=UI=10\text{ W}>0$, 此元件吸收的功率为 10 W; 若电压和电流采用非关联参考方向如图 1-3-4(b) 所示, 则 $U=-5\text{ V}$, $I=2\text{ A}$, 仍然有 $P=-UI=10\text{ W}>0$, 因此, 参考方向的选择不会改变电路的实际工作情况。

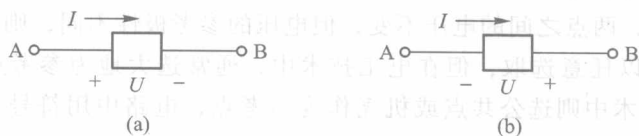


图 1-3-4 关联与非关联参考方向

例 1-3-2 图 1-3-5 是一个蓄电池充电电路, 已知蓄电池的电动势 $E=12\text{ V}$, 内阻 $R_{02}=1\ \Omega$; 供电电源内阻 $R_{01}=0.5\ \Omega$, 线路电阻 $R=0.5\ \Omega$, 电路中开关 S 断开时, 充电器(点画线框所示)的输出电压(称为开路电压) $U_1=14\text{ V}$ 。求:

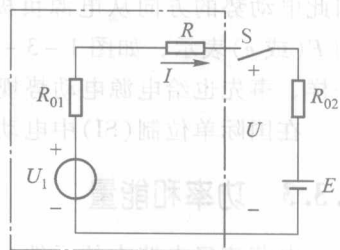


图 1-3-5 例 1-3-2 的图

- (1) 充电电流 I ;
- (2) 外电源提供给蓄电池的功率 P ;
- (3) 蓄电池中转变为化学能的功率 P_E , 内阻 R_{02} 消耗的功率。

解:

- (1) 由 $U_1 = I(R_{01} + R + R_{02}) + E$, 得

$$I = \frac{U_1 - E}{R_{01} + R + R_{02}} = \frac{(14 - 12)\text{ V}}{2\ \Omega} = 1\text{ A}$$

充电电源输出电压

$$U = U_1 - (R_{01} + R)I = 13\text{ V}$$

- (2) 外电源提供给蓄电池的功率 $P = -UI = -(13 \times 1)\text{ W} = -13\text{ W}$

- (3) 蓄电池中转变为化学能的功率 $P_E = EI = (12 \times 1)\text{ W} = 12\text{ W}$

内阻 R_{02} 消耗的功率

$$P_{R_{02}} = I^2 R_{02} = (1^2 \times 1)\text{ W} = 1\text{ W}$$

可见 $P + P_E + P_{R_{02}} = 0$, 即外电源发出的功率等于蓄电池转化为化学能的功率与蓄电池内阻消耗的功率, 达到功率平衡。

例 1-3-3 如图 1-3-6 所示电路, 求各元件的功率, 说明哪些是负载, 哪些是电源。

解: A 元件采用非关联参考方向, $P_A = -(20 \times 5)\text{ W} = -100\text{ W} < 0$ (产生)。

B 元件采用关联参考方向, $P_B = (20 \times 2)\text{ W} = 40\text{ W} > 0$ (吸收)。

C 元件采用非关联参考方向, $P_C = -(10 \times 3)\text{ W} =$

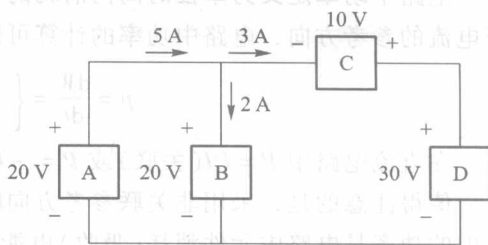


图 1-3-6 例 1-3-3 图