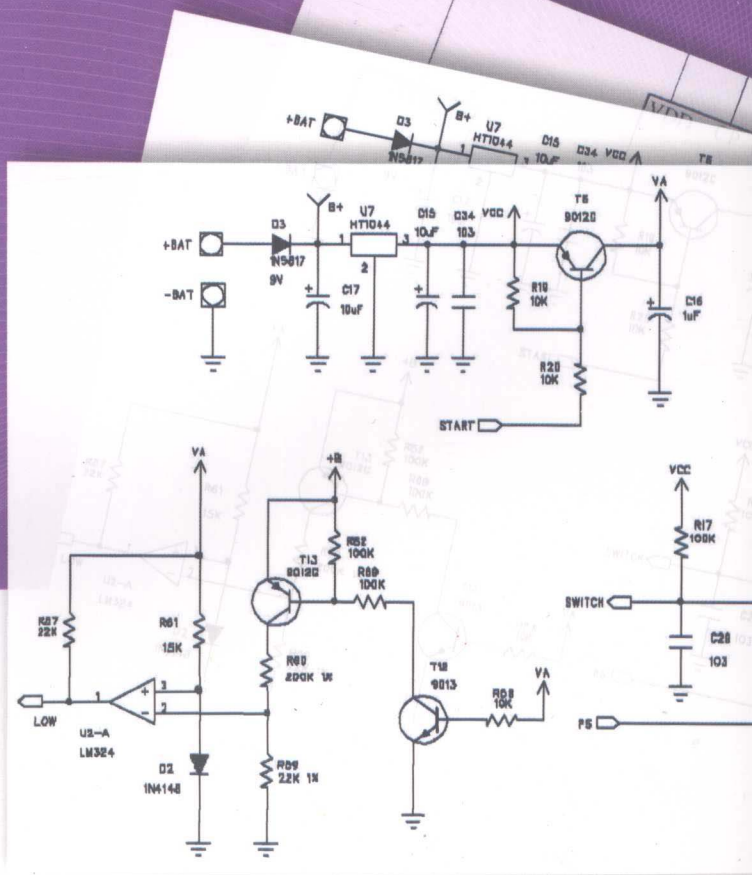


电路与 模拟电子技术

郭强 编著



- 涵盖电路分析基础知识和模拟电子技术基础知识
- 理论分析与例题详解相结合，贴近实际工程需求
- 内容精炼，讲解深入浅出，帮助读者整体掌握电路知识

TMB
428
1-

电路与模拟电子技术

郭 强 编著

科 学 出 版 社

内 容 提 要

本书是为了适应当前信息时代要求加快知识传授的速度、提高授课效率而编写的。教材内容涵盖了电路分析和模拟电子技术这两种相关课程的主要知识。

本教材以夯实电路基础为宗旨，主要阐述了电路的基本概念与基本定律、简单线性电路的分析方法、动态电路时域分析方法、正弦稳态电路分析方法、三相电路及其频率特性、半导体材料和晶体二极管、双极型晶体管、晶体管放大电路基础、场效应管及其放大电路、模拟集成单元电路、负反馈技术、集成运算放大器及应用。

本书可作为高等院校工科学生的一门电子技术基础课教材，也可供其他专业的学生选学，对于广大电子电路工作者，本书也是一本有实用价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/郭强编著.—北京：科学出版社，2008
ISBN 978-7-03-022554-2

I.电… II.郭… III.①电路理论②模拟电路—电子技术
IV.TM13 TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第108148号

责任编辑：张少波 / 责任校对：杨慧芳

责任印刷：科海 / 封面设计：林陶

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京市鑫山源印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年9月第一版

开本：16开

2008年9月第一次印刷

印张：17

印数：1-4000

字数：413千字

定价：27.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

21 世纪是科学技术飞速发展的时代，电路与电子技术得到了广泛应用。本书是参照近年来电子技术的最新发展，为高校及各类培训机构所编写的教材。

编写本书的指导思想是：既要适应 21 世纪中国高等教育应用型人才的培养目标和要求，反映应用型教学的特点，贴近实际需要，精选教材内容，体现“简明”特点，注重实践能力和创新精神的培养；又必须达到高等学校电路分析和模拟电子技术教材应有的科学水平，满足电气信息类专业对电子线路课程的基本要求。本书总体分为两部分：第一部分为电路分析，主要讲述各种电路分析的方法及基本定律的应用；第二部分为模拟电子技术，主要讲述实际应用中各种电子元件及电路构成。

在第一部分（第 1 章～第 5 章），为了使读者尽快掌握电路分析理论，本书削枝强干，重点讲述了电路基础理论和基本分析方法，主要内容包括：电路的基本概念与基本定律、简单线性电路分析、动态电路时域分析、正弦稳态电路分析、三相电路及其频率特性。由于电子电路是电阻、电容等电子元件按照一定的规律组合而成的，各种复杂的电子电路也都是由若干个基本电子电路组合而成的，因此学习时要求熟记一些基本电子电路的结构和特性，并掌握它们的组合规律。在讲述过程中，以集总电路中的电压电流关系的“两类约束”统领全书，注重说明各种分析方法之间的内在联系和普遍规律，前后呼应，结构严谨，层次清晰，力求构建一个好的教材体系。同时，在讲述理论分析方法时，注重理论和实践的紧密结合，在介绍理想电路元件和分析方法的同时，适当介绍工程背景，强调在工程电路中的分析和应用。

在第二部分（第 6 章～第 12 章），由浅入深地讲述了模拟电子技术的基本知识。这部分知识是电气信息类、自动控制类专业在电子技术方面的入门级技术基础知识。通过对模拟电子技术原理的学习及对其应用的了解，读者能够获得电子技术方面的基本理论、基本知识、基本技能，培养分析和解决问题的能力。由于模拟电子技术是大多数读者第一次接触到的工程性、技术性而非理论性的课程，进行精确的分析计算难度较大，再加上电子器件的特性和参数分散性较大，电路元件的参数也有一定的误差，因此工程上通常是先采用近似算法对电路进行粗略的估算，然后通过实验调试来达到预定的设计要求，这就给初学者带来很大困扰，在学习时要多加重视。

本书能够在如此短的时间内出版，要特别感谢为本书付出辛勤劳动的所有工作人员，没有他们，这本书就不会顺利地出版。本书内容较多，工作量大，再加上编写时间较短，书中难免有不当和疏漏之处，敬请读者对本书提出宝贵意见和建议。

为提高教师的授课质量和效果，减轻授课教师的备课压力，本书备有电子教案，教师可致电 010-82896438 或发 E-mail:feedback@khp.com.cn 获取。

编者
2008年7月

目 录

第 1 章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.1.1 电路概念	1
1.1.2 实际电路和电气原理图	2
1.1.3 理想电路模型	3
1.2 电路参量及其参考方向	4
1.2.1 电流及其参考方向	5
1.2.2 电压及其参考方向	6
1.2.3 功率和能量	7
1.3 基尔霍夫定律	8
1.3.1 电路结构相关术语	9
1.3.2 基尔霍夫电流定律	9
1.3.3 基尔霍夫电压定律	10
1.4 电路元件及其模型	12
1.4.1 电阻元件	12
1.4.2 独立电压源	15
1.4.3 独立电流源	15
1.4.4 受控源	16
小结与提高	18
思考与练习	18
第 2 章 简单线性电路分析	20
2.1 支路电流法和支路电压法	20
2.1.1 支路电流法	20
2.1.2 支路电压法	23
2.2 线性电路基本定理	24
2.2.1 叠加原理	24
2.2.2 戴维南定理	26
2.2.3 诺顿定理	27
2.2.4 最大传输功率定理	28
2.3 双口网络	30
2.3.1 理想变压器	30
2.3.2 双口网络的电压电流关系	32
2.3.3 双口网络参数计算	35
2.3.4 互易双口和互易定理	37
小结与提高	38
思考与练习	39
第 3 章 动态电路时域分析	41
3.1 电容元件和电感元件	41
3.1.1 电容元件及其特性	41
3.1.2 电感元件及其特性	45
3.1.3 电路方程的建立	48
3.2 一阶电路	50
3.2.1 零输入响应	50
3.2.2 零状态响应	54
3.2.3 完全响应	57
3.2.4 三要素法	59
3.3 二阶电路分析	61
3.3.1 RLC 串联电路微分方程	61
3.3.2 RLC 电路的零输入响应	62
小结与提高	65
思考与练习	65
第 4 章 正弦稳态电路分析	67
4.1 正弦交流电路	67
4.1.1 正弦交流电及其相量表示	67
4.1.2 正弦稳态响应分析	71
4.2 基尔霍夫定律的相量形式	73
4.3 正弦稳态电路的功率	75
4.3.1 电阻元件的功率	75
4.3.2 电感元件和电容元件的功率	76
4.3.3 单口网络的功率	78
4.4 正弦稳态电路最大功率传输定理	80
4.4.1 复数形式的阻抗和导纳	80
4.4.2 最大功率传输定理	81
小结与提高	84
思考与练习	84

第 5 章 三相电路及其频率特性 86	第 7 章 双极型晶体管 127
5.1 三相电路86	7.1 BJT 原理分析 127
5.1.1 三相电源86	7.1.1 BJT 的结构 127
5.1.2 三相电源的连接87	7.1.2 放大状态下 BJT 的 工作原理 128
5.1.3 三相电路的连接89	7.1.3 BJT 电压电流放大关系 130
5.1.4 三相电路的功率92	7.1.4 BJT 的伏安特性曲线 131
5.2 电路的网络函数.....94	7.2 BJT 主要参数 133
5.3 电路的频率特性.....97	7.2.1 直流参数 133
5.3.1 网络函数特性97	7.2.2 交流参数 134
5.3.2 RC 低通滤波电路97	7.2.3 极限参数 135
5.3.3 RC 高通滤波电路100	7.3 BJT 的温度效应和小信号模型 136
5.4 RLC 谐振电路101	7.3.1 温度效应 136
5.4.1 RLC 串联谐振电路102	7.3.2 小信号放大原理..... 136
5.4.2 RLC 并联谐振电路105	7.3.3 BJT 小信号模型..... 138
小结与提高107	7.4 BJT 的命名规则 141
思考与练习108	小结与提高..... 142
第 6 章 半导体材料和晶体二极管 110	思考与练习..... 142
6.1 半导体材料110	第 8 章 晶体管放大电路基础 144
6.1.1 本征半导体110	8.1 实用放大电路的工作原理 144
6.1.2 杂质半导体112	8.1.1 对实用放大电路的 一般要求 144
6.1.3 半导体中的电流113	8.1.2 放大电路的基本原理..... 145
6.2 PN 结113	8.1.3 放大器的直流通路和 交流通路 146
6.2.1 PN 结的形成113	8.2 BJT 放大电路基本分析 148
6.2.2 PN 结的单向导电特性115	8.2.1 放大电路静态分析..... 148
6.2.3 PN 结的电容效应和 反向击穿特性116	8.2.2 放大电路动态分析..... 150
6.3 半导体二极管118	8.2.3 放大电路主要性能指标..... 151
6.3.1 二极管的结构118	8.3 BJT 三种基本组态放大器 153
6.3.2 二极管的伏安特性118	8.3.1 放大器小信号分析 方法概述 153
6.3.3 二极管的主要参数119	8.3.2 共射放大电路..... 154
6.3.4 简单的二极管应用电路.....120	8.3.3 共集放大电路..... 156
6.3.5 二极管等效电路121	8.3.4 共基放大电路..... 157
6.4 几种特殊的二极管.....123	8.3.5 BJT 三种基本组态放大器 的比较 158
6.4.1 稳压管123	
6.4.2 其他类型二极管简介124	
小结与提高125	
思考与练习125	

8.4 多级放大电路	159	第 10 章 模拟集成单元电路	195
8.4.1 耦合方式	159	10.1 模拟集成单元电路概述	195
8.4.2 多级放大器指标的计算	161	10.2 恒流源电路	196
8.4.3 三种组合放大电路	163	10.2.1 恒流源的模型和电路原理	196
小结与提高	165	10.2.2 镜像恒流源	197
思考与练习	166	10.2.3 微电流恒流源	199
第 9 章 场效应管及其放大电路	169	10.2.4 比例恒流源	200
9.1 场效应管概述	169	10.3 差动放大器	201
9.2 结型场效应管(JFET)	170	10.3.1 差动放大器的电路特点	
9.2.1 结型场效应管的结构	170	和性能指标	201
9.2.2 结型场效应管的工作原理	170	10.3.2 差动放大器的分析方法	
9.2.3 结型场效应管的特性曲线	173	和工作特点	203
9.3 N 沟道增强型 MOSFET	175	10.4 功率放大电路	208
9.3.1 N 沟道增强型 MOSFET		10.4.1 功率放大电路的特点	
的结构	176	与分类	209
9.3.2 N 沟道增强型 MOSFET		10.4.2 双电源互补推挽乙类	
的工作原理	176	功率放大器	210
9.3.3 N 沟道增强型 MOSFET		小结与提高	213
的特性曲线	177	思考与练习	213
9.4 其他类型 MOS 管以及 MOS 管		第 11 章 负反馈技术	216
的参数	178	11.1 反馈的基本概念和类型	216
9.4.1 N 沟道耗尽型 MOSFET	178	11.1.1 反馈的基本概念	216
9.4.2 P 沟道 MOSFET	179	11.1.2 反馈增益的概念及	
9.4.3 FET 的主要参数	180	一般表达式	217
9.4.4 场效应管的特点	182	11.2 反馈放大器的类型及分析方法	218
9.5 场效应管放大电路	182	11.2.1 反馈放大器的类型	218
9.5.1 场效应管的偏置电路	183	11.2.2 简单反馈电路分析	220
9.5.2 场效应管的小信号模型	184	11.3 负反馈对放大电路的影响	222
9.5.3 共源极场效应管放大电路	185	11.3.1 对电路增益的影响	222
9.5.4 共漏极场效应管放大电路	187	11.3.2 对输入输出电阻的影响	223
9.5.5 共栅极场效应管放大电路	189	11.3.3 对通频带的影响	225
9.6 三种基本放大电路的性能比较	190	11.3.4 对非线性失真的影响	226
小结与提高	192	11.4 自激振荡和反馈电路的设计原则	227
思考与练习	192	11.4.1 自激振荡	227
		11.4.2 放大电路中引入负反馈	
		的原则	228
		小结与提高	230

思考与练习	230	12.3.4 积分运算电路	246
第 12 章 集成运算放大器及应用	233	12.4 集成运算放大器在信号处理 方面的应用	248
12.1 集成运算放大电路概述	233	12.4.1 有源滤波器	248
12.2 集成运算放大器特性	235	12.4.2 采样保持电路	251
12.2.1 典型的通用型集成运放 F007 内部电路分析	235	12.4.3 电压比较器	252
12.2.2 集成运算放大器参数	236	12.5 设计运算放大器电路的原则	252
12.2.3 理想运算放大器	238	小结与提高	255
12.3 集成运算放大器的简单运用	242	思考与练习	255
12.3.1 加法运算电路	242	习题答案	258
12.3.2 减法运算电路	244	参考文献	263
12.3.3 微分运算电路	245		

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

从本质上讲，人类对于电的应用主要集中在两个方面：1.电能的应用，也就是现代工业生产和家庭生活所使用的电力系统；2.信息方面的应用，也就是人们日常使用的个人计算机等信息处理系统。本书主要着眼于第 2 点。但同时也要记住，一切电路都是受同样的基本规律所支配，学好电路理论的基本知识，是进一步学习复杂电路理论的基础。

【本章要点】

- 集总参数电路的概念和特点
- 集总参数电路的基本定律——基尔霍夫定律
- 三种常用的电路元件——电阻、独立电流源和独立电压源

1.1 电路与电路模型

实际使用的电路往往比较复杂，为了便于分析，在这里，我们抓住一些主要因素，从实际电路的本质建立便于分析的电路模型。

1.1.1 电路概念

实际电路是具有一定尺寸的，根据电路尺寸和电路工作频率的关系，可以将电路分为两大类：集总参数电路和分布参数电路。

根据初高中物理知识可知，电路的工作频率 f 和工作波长 λ 有如下关系：

$$C = f \times \lambda (C \text{ 为真空中的光速}) \quad (1-1)$$

这样就可以根据电路的工作波长求出其工作频率，或者根据工作频率求出工作波长，因此这两个电路参数是等价的。

1. 集总参数电路

实际电路是有一定尺寸的，如果电路的几何尺寸 d 远小于电路的工作波长 λ ，即满足 $d \ll \lambda$ (λ 的长度是 d 的 10 倍以上)，这样的电路称为集总参数电路。集总参数电路的特点是不必考虑电磁波的传播过程，认为电信号的传输是瞬间完成的，而且电路中的电压和电流是恒定的，与器件的几何尺寸和空间位置无关。

【例 1-1】 电风扇电路的集总假设验证。

我国的电力用电标准是 50Hz，对应的工作波长为 6000km，显然远大于家用电风扇的几何尺寸，因此可以认为电风扇电路是集总参数电路。

2. 分布参数电路

如果电路的几何尺寸 d 和工作波长 λ 不满足 $d \ll \lambda$ ，这样的电路称为分布参数电路。分布参数电路的特点是需要考虑电磁波在电路中的沿线传播过程，而且电路中的电压和电流不仅是时间的函数，还与器件的几何尺寸和空间位置有关。

【例 1-2】 手机电路的分布假设验证。

手机的电路板一般都在 $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ 以内，这样就可以说其电路的几何尺寸 d 是 10cm。GSM 手机工作频率是 1800MHz，对应的工作波长 λ 约为 17cm，不满足 $d \ll \lambda$ 的条件，因此手机电路是分布参数电路。

集总假设是本书的前提，此后所述的电路基本定律、定理等均是在这一假设的前提下才能成立的。

1.1.2 实际电路和电气原理图

实际电路是由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、传输线、电池、发电机和信号发生器等一些电气器件按一定的方式连接而成的电流的通路。如图 1-1 所示的手电筒实际电路，它主要由干电池、开关、灯泡组成，其中的导线连路代表这 3 个部件的连接关系。

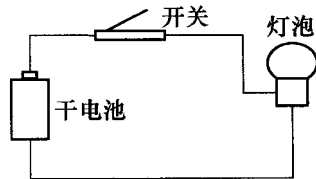


图 1-1 手电筒实际电路

同样也可以使用一些标准的图形符号来画出表明电路中各个器件连接关系的电路原理图，比如图 1-2 就是手电筒电路的电气原理图。

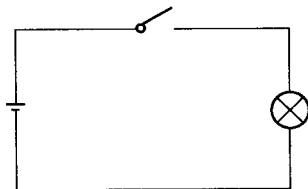


图 1-2 手电筒电路的电气原理图

为了避免混淆，在画电路原理图时最好使用标准的图形符号，表 1-1 列举了我国国家标准中的部分电气图用图形符号，要查找更多的图形符号可查阅相关国家标准手册。

表 1-1 部分电气图用图形符号

(根据国家标准 GBA728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线	—	传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈、绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		PNP型半导体管		铁芯变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
直流电压表		电池		直流电动机	

1.1.3 理想电路模型

研究集总参数电路，并不是直接使用电气仪表对实际电路进行测量，而是将实际电路抽象为电路模型，然后使用电路理论方法分析计算电路的电气特性。

首先要将实际电路抽象为电路模型。实际电路的元件，往往伴随着各种电磁效应，如果对实际器件的所有性质都加以考虑，工作量将十分巨大甚至不可完成。在一定条件下，可以忽略器件的复杂电磁场效应，只考虑其某种单一的电磁性能。例如，定义理想电阻元件是一种只吸收电能的元件；理想电容元件是一种只存储电场能量的元件；理想电感元件是一种只存储磁场的元件。然后用理想导线连接这些电路元件，从而得到实际电路的理想电路模型。

如图 1-3 所示为手电筒电路的理想电路模型，干电池被抽象为一个理想电压源和理想电阻的串联，灯泡被抽象为理想电阻 R_L ，然后用理想导线连接开关就形成了一个理想电路模型。

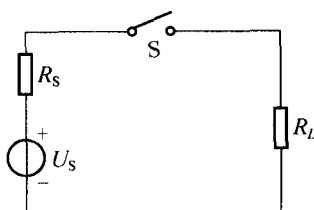


图 1-3 手电筒电路的理想电路模型

这里强调理想电路元件,是因为在实际中,即使是一个线圈,也同时具有电阻、电容和电感的性质,所以在不同条件下,要选取其不同的性质。线圈在不同条件下的理想电路模型如图 1-4 所示。

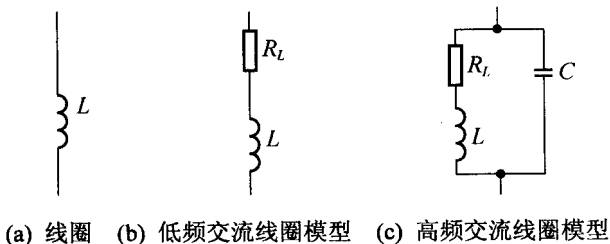


图 1-4 线圈的几种理想电路模型

在绘制理想电路图时,同样要注意使用标准的图形符号,表 1-2 给出了部分电路元件的图形符号,在后面的讲解中会使用到这些符号,最好记住常用符号的代表意义。

表 1-2 部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
独立电流源		理想导线		电容	
独立电压源		连接的导线		电感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器耦合电器	
受控电压源		理想开关		回转器	
电阻		开路		理想运放	
可变电阻		短路		二端元件	
非线性电阻		理想二极管			

要将实际电路抽象为理想电路,需要综合考虑器件在电路中的性质,选取合适的理想元件,但有时情况会十分复杂。本书是基础类教程,主要讨论已知电路结构和元件特性的情况下,如何分析电路的电气特性。

1.2 电路参量及其参考方向

要描述电路的性质,就需要使用电荷、电流、电压、磁通和电功率等物理量。电路分析的主要任务就是分析和计算电路中的电流、电压和功率。本书采用国际单位制(SI),现列

举部分国际单位制符号(表 1-3)。

表 1-3 常用国际单位制单位表

物理量	单位名称	符号	物理量	单位名称	符号
长度	米	m	电荷	库(仑)	C
时间	秒	s	电压	伏(特)	V
电流	安(培)	A	电容	法(拉)	F
频率	赫(兹)	Hz	电阻	欧(姆)	Ω
能量	焦(耳)	J	电导	西(门子)	S
功率	瓦(特)	W	电感	亨(利)	H

在实际使用中需要在单位制前加上量纲词头，从而构成国际单位制的倍数或者分数，现列举部分常用词头(表 1-4)。

表 1-4 常用国际单位制单位表

因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p

1.2.1 电流及其参考方向

电流是由带电粒子的定向运动而产生的。电流的物理定义是：单位时间内通过某截面的电荷量为该点的电流，用符号 i 或 I 表示

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制(SI)中，电流的单位是安培(A)。

带电粒子包括电子、负离子以及正离子，习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。如果 $i(t)$ 是常数，称为恒定电流，简称为直流，用符号 I 表示；如果 $i(t)$ 随 t 变化，称为时变电流，用符号 i 表示；有一种特殊的时变电流， $i(t)$ 的量值和方向作周期性变化且平均值为零，称为交流，用符号 ac 或 AC 表示。

虽然定义了电流的方向，但是在分析电路时，往往不能预知电流的实际方向。因此需要事先设定一个电流的参考方向，用箭头标注在电路上，再计算电流的数值。如果计算出的电流为正值，表示电流的实际方向与参考方向相同；如果计算出的电流为负值，表示实际方向和参考方向相反。如图 1-5 所示，其中虚线代表电流的实际方向，实线代表电流的参考方向。

也可以使用下标来表示电流的方向，如图 1-5(a)中的实际电流可以表示为 i_{ab} ，下标 ab 表示电流是从 a 点流向 b 点，显然有 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

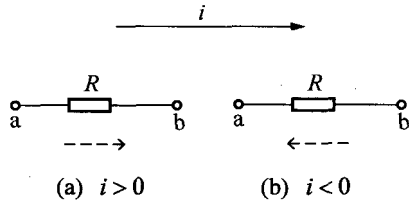


图 1-5 电流方向和参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

电荷在电场力的作用下在电路中移动,会发生能量的交换。定义电路中 ab 两点间的电压为:单位正电荷从电路中的 a 点移动到 b 点所得到或失去的能量,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

其中 dq 为从 a 点移动到 b 点的单位电荷,单位为库仑(C), dW 是电荷移动过程中能量的变化量,单位为焦耳(J), u 就是 ab 两点间的电压,单位为伏特(V)。

电压代表单位正电荷从 a 点运动到 b 点的能量变化,如果正电荷从 a 点到 b 点时失去了能量,就表示 a 点电压高于 b 点电压;反之, b 点电压高于 a 点电压。

如果定义电路中某一点为参考点,则由 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位,用符号 v_a 或 V_a 表示。在分析电路时,往往关心两点间的相对电压, ab 两点间的相对电压用符号 u_{ab} 表示。

如果电压的大小和方向均不随时间变化,称为恒定电压或直流电压,一般用符号 U 表示;大小或方向随时间变化的电压称为时变电压,一般用符号 u 表示。

与电流类似,电压也需要规定参考极性,如图 1-6 所示,用“+”和“-”表示电压的正极和负极,也可以用箭头表示,从正极指向负极。

如果按照参考极性计算出的电压值 $u_{ab} > 0$,则表示实际电压极性与参考极性相同;如果计算出 $u_{ab} < 0$,则表示实际电压极性与参考极性相反。

同理,对电路中同一电压规定相反的参考极性时,相应的电压表达式相差一个负号,即

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

由上述可知,在分析电路时需要规定电流的参考方向和电压的参考极性,为了计算方便,可以采用电压和电流相关联的参考方向。这里的关联是指当首先指定电流的参考方向时,电压的参考极性也就确定了,正极为电流的输入端;当首先指定电压的参考极性时,

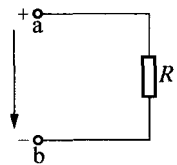


图 1-6 电压参考极性

电流的参考方向也就确定了，电流从正极流向负极。如图 1-7(a)所示为电流电压相关联的参考方向，图 1-7(b)所示为非关联参考方向。除特别说明外，本书后续章节都采用电流与电压相关联的参考方向。

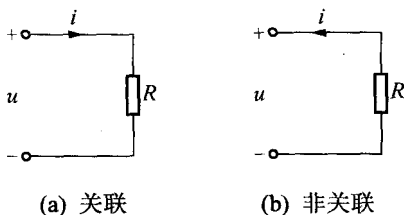


图 1-7 电流与电压的关联和非关联参考方向

1.2.3 功率和能量

功率是用来表示电能转换快慢的物理量，定义为单位时间内吸收或产生的电能，即

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-4)$$

而 $i = \frac{dq}{dt}$ ， $u = \frac{dW}{dq}$ ，所以

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui$$

所以当电流和电压采用关联参考方向时，器件两端的电流和电压乘积就是器件所消耗（或产生）的功率。当求得的功率 p 为正值时表示器件实际消耗了功率；当 p 为负值时表示器件实际产生了功率。由于封闭系统能量守恒，所以一个完整的电路在任意时刻，所有元件的功率代数总和为零。比如一个由 n 个器件构成的电路，则有

$$\sum_{k=1}^n u_k i_k = 0 \quad (1-5)$$

由功率的定义可知，从 t_0 到 t 时间段内，器件消耗的能量为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

【例 1-3】 电路功率的计算。

如图 1-8 所示电路由 3 个元件构成，已知 $U_1 = 5V$ ， $U_3 = 8V$ ，电流 $I_1 = I_2 = I_3 = 1A$ ，电流参考方向如图所示为顺时针方向，各元件电压参考极性如图所示，求：(1) 每个元件的功率，并指出哪些是电源，哪些是负载。(2) U_2 的值。

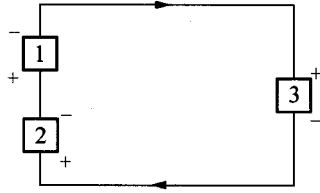


图 1-8 例 1-3 电路图

解：(1) 由于每个元件都采用了关联参考方向，所以元件 1 和元件 2 的功率分别是

$$P_1 = U_1 I_1 = 5 \times 1 = 5 \text{ W}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 8 \times 1 = 8 \text{ W}$$

由于电路所有元件的功率代数和为零，所以 $P_3 + P_2 + P_1 = 0$ ，即

$$P_2 = -P_3 - P_1 = -13 \text{ W}$$

所以，元件 1 和元件 3 功率为正，表示消耗功率，为负载；元件 2 的功率为负，表示提供功率，为电源。

(2) $P_2 = U_2 I_2 = U_2 \times 1 = -13 \text{ W}$ ，所以 $U_2 = -13 \text{ V}$

本例题的电路原型就是 1.1.2 节中的手电筒电路，如图 1-9 所示，对比两图可更好地理解参考方向和实际方向的关系。

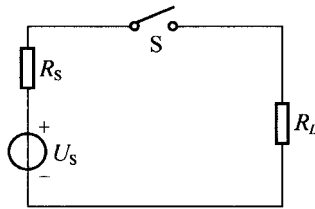


图 1-9 手电筒电路

1.3 基尔霍夫定律

电路是由一个个的元件组成的，在工作时电流流过元件并在元件两端产生电压，这些电流和电压不但受元件本身的特性约束，而且还受元件之间的相互连接关系约束。元件本身对电流和电压的约束称为电流电压关系，简称 VCR(voltage current relationship)；元件连接方式对电流电压的约束是拓扑约束，基尔霍夫建立了电路结构与电压电流的关系，称为基尔霍夫定律。基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's current law, KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)。