

董传岱 主编



电工与电子基础



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电工与电子基础

主 编 山东理工大学 董传岱
副主编 河南科技大学 唐之义
参 编 厦门大学 林育兹
山东理工大学 李震梅 房华玲 任鲁涌 张连俊
主 审 武汉船舶职业技术学院 张丹平

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是作者在多年从事电工电子教学工作的基础上编写而成的。其中电工技术部分包括直流电路、正弦交流电路、电路的暂态分析、铁心线圈电路与变压器、异步电动机及其控制;电子技术部分包括半导体器件的基本知识、放大电路的原理和分析基础、集成运算放大器及其应用、正弦波振荡电路、整流与直流稳压电源、基本逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路。本书文字叙述详细,概念阐述清楚、通俗易懂,简化理论推导,突出应用实训内容,可作为高职、高专、夜大、函大等大专层次非电类专业学生电工电子课程的教材,也可作为非电类工程师以及其它有关专业人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子基础 / 董传岱主编. —北京: 国防工业出版社, 2004. 6

ISBN 7-118-03688-6

I. 电... II. 董... III. ①电工技术-高等学校: 技术学校-教材②电子技术-高等学校: 技术学校-教材
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 123366 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 $\frac{1}{2}$ 字数 424 千字

2004 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

电工与电子基础是面向高职、高专、夜大、函大等大专层次非电类专业学生的一门技术基础课程。通过本课程的学习使学生获得电工技术与电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,为学习后续课程和专业知识以及毕业后从事工程技术工作打下理论基础和实践基础。

本教材是根据教育部[2000]2号文件精神,参考教育部(前国家教育委员会)1995年颁发的高等工业学校“电工技术(电工学Ⅰ)”和“电子技术(电工学Ⅱ)”两门课程的教学基本要求编写的。

本书是作者从事多年电工电子教学工作的基础上编写而成的。在本教材编写过程中,我们本着下列原则:精选教学内容、深浅适度、主次分明、详略恰当、处处考虑职业教育特点,在内容的阐述方面,以物理概念为主,突出实践性、实用性,力求做到文字通顺流畅,通俗易懂,以便学生学习。

本书包含电工技术基础和电子技术基础两大部分。电工技术内容有:电路模型和基本定律、电路的基本分析方法、正弦交流电路的基本概念和稳态分析、三相正弦交流电路、电路的暂态分析、磁路和铁心线圈电路、异步电动机及其控制。电子技术内容有:半导体器件的基本知识、放大电路的原理和分析基础、负反馈放大电路、集成运算放大器及其应用、正弦波振荡器、整流与直流电源、数制和码制、逻辑代数、基本逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、定时器电路等。

董传岱组织了本书的编写,制定了详细的编写提纲,并负责了全书的统稿工作。全书共14章,其中第1、2章由唐之义编写;第3、6、9章由李震梅编写;第4、5、8章由董传岱编写;第7、11章由房华玲编写;第10章由张连俊编写;第12、13章由林育兹编写;第14章由任鲁涌编写。

本书由武汉船舶职业技术学院的张丹平副教授主审,他详细地审阅了编写大纲以及全部书稿,提出了许多宝贵意见和建议。另外,石油大学(华东)的刘润华教授详细地审阅了编写大纲,并提出了许多宝贵意见和建议。编者在这里一并向他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平,本书中不妥和错误之处在所难免,望读者及同行老师们给以批评指正。

编者

目 录

序
前言

第 1 章 直流电路	1
1.1 电路模型	1
1.1.1 电路的组成部分	1
1.1.2 电路模型	2
1.2 电路的基本物理量	2
1.2.1 电流	2
1.2.2 电压与电动势	3
1.2.3 电功率	5
1.3 欧姆定律	6
1.4 电路的工作状态	7
1.4.1 有载工作状态	7
1.4.2 开路	8
1.4.3 短路与短接	8
1.5 基尔霍夫定律	9
1.5.1 基尔霍夫电流定律(KCL)	9
1.5.2 基尔霍夫电压定律(KVL)	10
1.6 电阻的联接方式及其转换	11
1.6.1 电阻的串联	11
1.6.2 电阻的并联	12
1.6.3 电阻 Y 联接与 Δ 联结的等效变换	15
1.7 电压源与电流源及其等效变换	17
1.7.1 电压源	17
1.7.2 电流源	18
1.7.3 电压源与电流源的等效变换	19
1.8 支路电流法	23
1.9 节点电压法	24
1.10 叠加原理	25
1.10.1 叠加原理的内容	25
1.10.2 使用叠加原理应注意的问题	26
1.11 戴维南定理	27
复习思考题	31

第 2 章 正弦交流电路	35
2.1 正弦交流电压与电流	35
2.1.1 正弦交流电的概念	35
2.1.2 正弦量的三要素	35
2.1.3 正弦交流电的相量表示法	39
2.2 电阻元件的交流电路	43
2.2.1 电阻元件	43
2.2.2 电阻元件的交流电路	43
2.3 电感元件的交流电路	44
2.3.1 电感元件	44
2.3.2 电感元件的交流电路	45
2.4 电容元件的交流电路	46
2.4.1 电容元件	46
2.4.2 电容元件的交流电路	47
2.5 RL 串联的交流电路	49
2.5.1 伏安特性	49
2.5.2 RL 串联电路的功率	50
2.6 RC 串联交流电路	52
2.6.1 伏安特性	52
2.6.2 RC 串联电路的功率	53
2.7 RLC 交流电路	54
2.7.1 RLC 串联谐振电路	54
2.7.2 RLC 并联谐振电路	57
2.8 功率因数的提高	59
2.8.1 功率因数及提高功率因数的意义	59
2.8.2 提高功率因数的措施	60
复习思考题	62
第 3 章 三相正弦交流电路	66
3.1 三相交流电源	66
3.2 三相负载的 Y 联结	68
3.3 三相负载的 Δ 联结	70
3.4 三相电路的功率	72
3.4.1 三相功率的计算	72

3.4.2 三相功率的测量	73	5.5.2 仪用互感器	106
3.5 安全用电知识	74	5.5.3 三相变压器	107
3.5.1 安全用电常识	75	复习思考题	108
3.5.2 防触电的安全技术	75	第6章 异步电动机及其控制	110
3.5.3 安全用电的注意事项	76	6.1 三相异步电动机的结构与工作	
复习思考题	77	原理	110
第4章 电路的暂态分析	78	6.1.1 三相异步电动机的结构	110
4.1 换路定理	78	6.1.2 三相异步电动机的工作原理	111
4.1.1 产生暂态过程的原因	78	6.2 三相异步电动机的机械特性及	
4.1.2 换路定理及初始值的确定	78	其使用	114
4.2 RC 电路的暂态过程	80	6.2.1 三相异步电动机的电磁转矩与	
4.2.1 零输入响应	81	机械特性	114
4.2.2 零状态响应	82	6.2.2 三相异步电动机的接线	115
4.2.3 全响应	83	6.2.3 三相异步电动机的起动	115
4.3 一阶线性电路暂态分析的三要		6.2.4 三相异步电动机的反转	116
素法	84	6.2.5 三相异步电动机的调速	116
4.3.1 三要素分析法	84	6.2.6 三相异步电动机的制动	117
4.3.2 RL 电路的暂态过程	85	6.2.7 三相异步电动机的铭牌数据	117
复习思考题	89	6.3 常用低压控制电器	119
第5章 铁心线圈电路与变压器 ...	91	6.3.1 手动电器	119
5.1 磁场的基本物理量	91	6.3.2 自动电器	120
5.1.1 磁感应强度	91	6.4 三相笼型电动机的基本控制 ...	123
5.1.2 磁通	91	6.4.1 笼型电动机的点动控制线路	124
5.1.3 磁场强度	91	6.4.2 笼型电动机的起停控制线路	124
5.1.4 磁导率	92	6.4.3 笼型电动机的两地控制线路	125
5.2 磁路及其基本定律	93	6.4.4 笼型电动机的正反转控制线路 ...	125
5.2.1 磁性材料	93	6.5 单相异步电动机	126
5.2.2 磁路	94	复习思考题	128
5.2.3 磁路的基本定律	94	第7章 半导体器件的基本知识 ...	129
5.3 交流铁心线圈电路	95	7.1 半导体的导电特性	129
5.4 变压器	98	7.1.1 本征半导体及其导电特性	129
5.4.1 变压器的用途和基本结构	98	7.1.2 N 型半导体	130
5.4.2 变压器的工作原理	99	7.1.3 P 型半导体	131
5.4.3 变压器的外特性与效率	102	7.2 半导体二极管	131
5.4.4 单相变压器的同极性端及其		7.2.1 PN 结的形成及单向导电性	131
测定	103	7.2.2 二极管的基本结构	132
5.4.5 变压器的额定值	104	7.2.3 二极管的伏安特性	133
5.5 特殊变压器与三相变压器	105	7.2.4 二极管的主要参数	133
5.5.1 自耦变压器	105	7.2.5 稳压二极管	134

7.3 半导体三极管	135	8.8 差动放大电路	163
7.3.1 基本结构	135	8.8.1 差动放大电路的基本形式	163
7.3.2 晶体管的电流分配和放大原理	136	8.8.2 长尾式差动放大电路	164
7.3.3 伏安特性曲线	138	8.9 功率放大电路	168
7.3.4 主要参数	139	8.9.1 对功率放大器的要求	168
7.4 绝缘栅型场效应管	140	8.9.2 OTL 互补对称功率放大电路	169
7.4.1 增强型绝缘栅场效应管	140	8.9.3 OCL 互补对称功率放大电路	170
7.4.2 绝缘栅场效应管的四种基本 类型	141	8.9.4 采用复合管的互补对称功率放 大电路	170
7.4.3 主要参数	143	8.9.5 集成功率放大电路	171
7.4.4 场效应管和晶体三极管的比较	143	复习思考题	172
复习思考题	144	第 9 章 集成运算放大器及其应 用	175
第 8 章 放大电路的原理和分析 基础	146	9.1 集成运算放大器的简单介绍	175
8.1 基本放大电路	146	9.1.1 集成运算放大器的特点及其 电路组成	175
8.1.1 基本放大电路的组成	146	9.1.2 集成运算放大器的主要参数	176
8.1.2 直流通路和交流通路	147	9.1.3 理想运算放大器及其分析依据	178
8.1.3 静态工作点及其估算	147	9.2 比例运算电路	179
8.1.4 主要性能指标	148	9.2.1 反相比例运算电路	179
8.2 放大电路的图解分析法	149	9.2.2 同相比例运算电路	180
8.2.1 静态分析	149	9.2.3 差动比例运算电路	181
8.2.2 动态分析	150	9.3 反向比例求和电路	182
8.3 基本放大电路的微变等效电 路法	152	9.4 电压比较器	182
8.3.1 晶体管的微变等效电路	153	9.5 检测与测量实用电路	184
8.3.2 放大电路的微变等效电路	153	复习思考题	185
8.3.3 放大电路的性能指标	154	第 10 章 正弦波振荡电路	187
8.4 静态工作点稳定的放大电路	155	10.1 产生正弦波振荡的条件	187
8.4.1 静态工作点的稳定	155	10.1.1 自激振荡	187
8.4.2 静态工作点的估算	155	10.1.2 正弦波振荡电路的组成部分	188
8.4.3 性能指标	156	10.2 RC 振荡电路	188
8.5 射极输出器	157	10.2.1 RC 桥式振荡电路	188
8.5.1 射极输出器的静态分析	157	10.2.2 其它形式的 RC 振荡电路	190
8.5.2 射极输出器的特点	157	10.2.3 RC 振荡电路的特点	190
8.6 负反馈放大器	158	10.3 LC 振荡电路	191
8.6.1 反馈的概念及其组态	158	10.3.1 变压器反馈式 LC 振荡电路	191
8.6.2 负反馈的作用	158	10.3.2 其它形式的 LC 振荡电路	192
8.7 多级放大电路	160	10.3.3 LC 振荡电路应用举例——接近 开关	193
8.7.1 耦合方式及其特点	160		
8.7.2 RC 耦合多级放大电路	161		

10.4 石英晶体振荡电路	194	12.3.2 TTL 三态门	228
10.4.1 石英晶体的特性	194	12.3.3 MOS 反相器	230
10.4.2 石英晶体振荡电路	195	复习思考题	231
复习思考题	196	第 13 章 组合逻辑电路	233
第 11 章 整流与直流稳压电源 ...	198	13.1 逻辑代数的基本知识	233
11.1 直流电源的组成	198	13.1.1 逻辑代数的基本公式	233
11.2 整流电路	198	13.1.2 逻辑函数的公式化简法	234
11.2.1 单相半波整流电路	198	13.1.3 卡诺图化简法	235
11.2.2 单相桥式整流电路	200	13.2 组合逻辑电路的分析与设计	
11.3 滤波电路	202	方法	237
11.3.1 电容滤波器	202	13.2.1 组合逻辑电路的分析	237
11.3.2 RC - π 型滤波电路	203	13.2.2 组合逻辑电路的设计	238
11.4 稳压管稳压电路	204	13.3 加法器	239
11.5 串联型晶体管稳压电路	205	13.3.1 半加器	239
11.6 集成稳压电源	206	13.3.2 全加器	239
11.7 开关型稳压电路	207	13.4 译码器	240
11.8 晶闸管	209	13.4.1 编码器及其概念	240
11.8.1 基本结构	209	13.4.2 二进制译码器	241
11.8.2 导电特性与工作原理	209	13.4.3 二-十进制显示译码器	242
11.8.3 伏安特性	211	复习思考题	244
11.8.4 主要参数	211	第 14 章 触发器与时序逻辑电	
11.9 单相半控桥式整流电路	212	路	247
11.10 单结晶体管及其触发电路 ...	213	14.1 触发器	247
11.10.1 单结晶体管	214	14.1.1 RS 触发器	247
11.10.2 单结晶体管触发电路	215	14.1.2 JK 触发器和 D 触发器	248
复习思考题	216	14.1.3 触发器功能间的相互转换	250
第 12 章 基本逻辑门电路	218	14.2 寄存器	251
12.1 概述	218	14.2.1 数码寄存器	251
12.1.1 脉冲信号	218	14.2.2 移位寄存器	251
12.1.2 数制和码制	219	14.2.3 集成寄存器举例	252
12.1.3 数字电路分类	220	14.3 计数器	254
12.2 分立元件门电路	221	14.3.1 二进制计数器	254
12.2.1 三种基本逻辑运算	221	14.3.2 二-十进制计数器	256
12.2.2 二极管与门	223	14.3.3 N 进制计数器	258
12.2.3 二极管或门	223	14.4 555 集成定时器及其应用	259
12.2.4 晶体管非门	224	14.4.1 555 集成定时器简介	259
12.2.5 复合门电路	224	14.4.2 单稳态触发器	260
12.3 集成门电路	226	14.4.3 多谐振荡器	261
12.3.1 TTL 与非门	226	复习思考题	262
		参考文献	264

第1章 直流电路

本章讨论的主要内容是：电路的基本物理量，电路分析所用的基本概念，电路的基本定律和以电阻电路为例介绍的几种常用的电路分析方法：电源变换、支路电流法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理等。本章内容是电路分析与计算的基础。

1.1 电路模型

1.1.1 电路的组成部分

电路是为了完成某种功能，将电器元件或设备按一定方式联接起来而形成的系统，通常用以构成电流的通路。从日常生活中使用的用电设备到工农业生产、科学研究中用到的各种生产机械的电气控制部分及计算机、各种测试仪表等，从广义上说，都是实际中的电路。最简单电路如图 1-1a 所示。

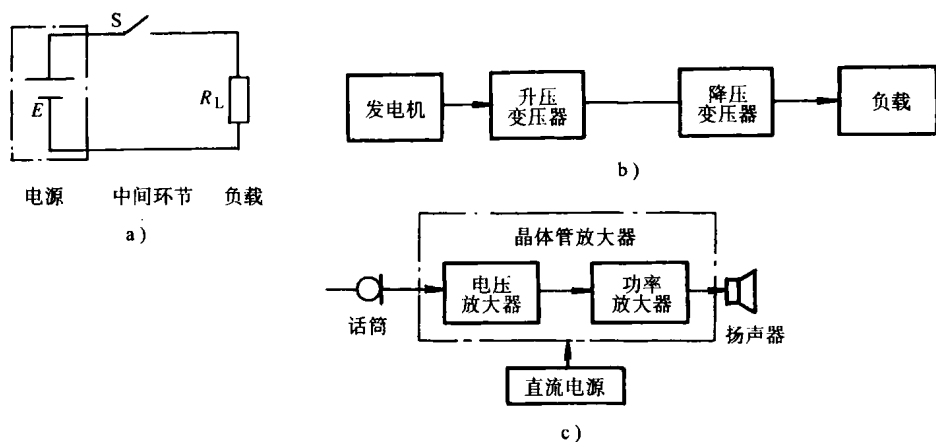


图 1-1 电路模型

实际电路的种类繁多，但就其功能来说，可以概括为两个方面：其一，是进行能量的传输、分配与转换。典型例子是电力系统中的输配电线路及用户负载构成的系统。在这一系统中，由发电机将其它形式的能量转换成电能，再通过变压器、输电线送到用户负载，负载又将电能转换成机械能、光能、热能等其它形式的能量（如电动机、灯、电炉等）；其二，是实现信息的传递与处理。典型的例子有电话、收音机、电视机等，这类电路的作用是将输入信号处理、放大后送到负载，负载将电信号转换成声音或图像等。图 1-1 中的 b、c 分别为这两方面电路的示意图。

电路的简繁不一，但就其组成，大致有以下三个部分：电源（或信号源）、负载和中间环节。对于简单和复杂电路来说，最大的区别就是中间环节的复杂程度。照明灯的中间环节可以是两条导线、一个开关，而收音机、电视机的中间环节就复杂得多。

电源（或信号源）的电压或电流信号通常称为电路的激励，在激励的作用下，电路各部分产生的电压和电流称为响应。讨论在已知条件下，电路激励与响应的关系，是电路分析的

主要内容。

1.1.2 电路模型

实际电路中所使用的元件的电磁性能较为复杂，为了便于对实际电路进行分析和数学描述，引出电路模型这一概念。所谓电路模型，是指由一些理想元件组成的电路，是对实际电路进行科学抽象与概括的结果。理想电路元件是在一定条件下突出其主要电磁性能，只反映某一种能量转换的元件。理想元件主要有：电阻元件、电感元件、电容元件，这几种为无源的理想元件；此外有源的理想元件，常用到的有电压源和电流源，其电路模型的图形符号如图 1-2 所示。

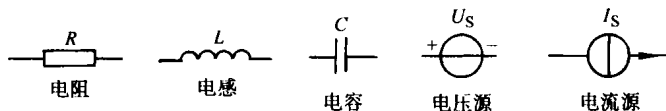


图 1-2 元件的基本模型

电阻 R 这种理想电路元件，只反映电能转换为热能的物理过程。凡是通电流后能将电能转换为热能，而其它能量转换可以忽略的元件（例如白炽灯、电炉等），在电路分析中就可以将其看作一个电阻，或者说将理想元件 R 作为该元件的电路模型。

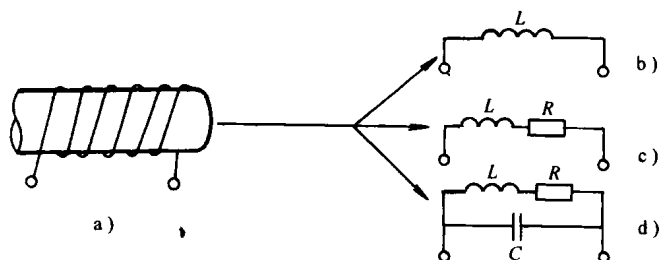


图 1-3 实际线圈在不同条件下的模型

电感 L 主要物理特性是储存磁能，而一个实际的线圈在低频电路中主要也体现了储存磁场能量的特点，所以可以用理想元件电感 L ，或 L 与 R 串联组合，作为线圈的模型；在高频情况下，有时也需要考虑它所储存的电场能，如图 1-3 所示。

电容元件主要物理特性是储存电场能。

有源器件中的电压源和电流源是一个实际电源的两种不同模型：一种用电压表示，称为电压源；另一种用电流形式表示，称为电流源。电压源可以看作是理想电压源和电阻串联的组合，电流源可以看作理想电流源和电阻（内阻）并联的组合。所以，理想电压源和理想电流源是实际电源抽象出来的一种模型，如图 1-4 所示。

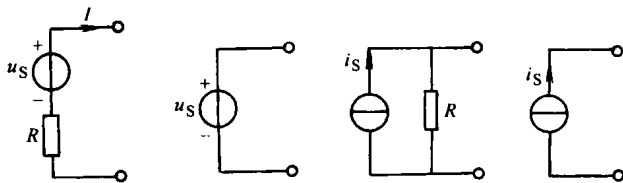


图 1-4 电源模型

此外，还有受控源，这里不作介绍。

今后，所分析的都是实际电路的电路模型，简称电路。在电路图中，各种电路元件用规定的图形符号表示，在没有特别说明的情况下，对联接图中各元件导线的电阻忽略不计。

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流

1.2.1.1 电流的实际方向

电流是由电荷作定向运动而形成的。金属导体内含有大量自由电子（带负电荷）在电场力作用下作定向移动，如图 1-5a 所示。

自由电子移动形成电流，其作用效果与等量正电荷在电场力作用下移动是一致的。因此习惯上把正电荷运动的方向定为电流的实际方向，即由电源正端出发回到电源负端，如图 1-5b 所示。

计量电流大小的物理量称为电流强度，简称电流。电流强度的定义为：单位时间 t 内通过导体横截面的电量 Q 。如果任一瞬间这个电量是恒定的，则电流强度 I 为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

根据国家标准，将不随时间变化的恒定量（也称直流量）用大写字母表示，而随时间变化的物理量用小写字母表示：

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

i 为某瞬间电流数值，称瞬时值。

在国际单位制中，电流的单位为 A（安培），简称安。表示数量大的电流可用 kA（千安）， $1\text{kA} = 1000\text{A}$ ；表示较小的电流可用 mA（毫安）、 μA （微安）或 nA（纳安），它们的关系为

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A} = 10^9\text{nA}$$

1.2.1.2 电流的参考方向

在实际电路分析中，电流的实际方向往往是未知的，特别是在分析复杂电路时，各支路电流的实际方向有时是难以确定的，而对于交流电路中的电流更无法表示电流的实际方向，为此，引出参考方向的概念。

参考方向（也称正方向）就是任意选定某一方向作为电流的方向，所选电流的参考方向不一定与电流的实际方向一致，但不会影响电路分析所得结论的正确性。按参考方向求解得出的电流值有两种可能，得正值，说明参考方向与实际方向一致，若为负值，则说明参考方向与实际方向相反。

在图 1-6 中，电流 I_1 和 I_2 分别为 R_1 、 R_2 中电流的参考方向，由图中给出的电压和电阻值可得： $I_1 = 2\text{A}$ ， $I_2 = -2\text{A}$ ，由结果可知 R_1 中电流实际方向与参考方向 I_1 相同， R_2 中电流实际方向与参考方向 I_2 相反。可见有了电流的参考方向，再结合分析结果，就可以确定各支路电流的实际方向。而在电路中，电流未标明参考方向的前提下，讨论电流的正负值是无意义的。

1.2.2 电压与电动势

1.2.2.1 电压

1. 电压的概念 电压是衡量电场力对电荷作功能力大小的物理量。在图 1-5 中正电荷在电场力作用下，从 a 端（电源正极）移到 b 端（电源负极）形成电流使电阻发热，说明电场力作了功。所以，a、b 两点间，电压 U_{ab} 在数值上等于把单位正电荷从 a 点移到 b 点，电场力所作的功，表示为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

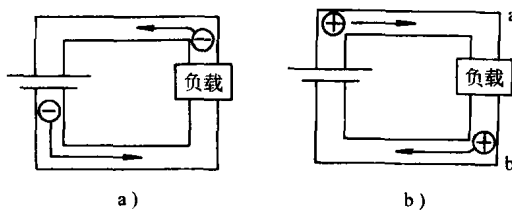


图 1-5 电荷运动示意图

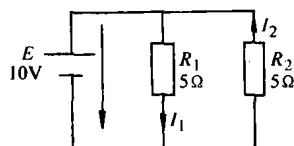


图 1-6 电路的参考方向与实际方向

电压又称为电压降或电位差 U_{ab} ，表明电源正极 a 点电位 U_a 高于负极 b 点电位 U_b ，故

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

式 (1-4) 中，电压为恒定数值，称为直流电压。随时间变化的电压则表示为：

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-5)$$

式中 q ——电量 (C)；

w ——电场力移动电荷所作的功 (J)；

u_{ab} ——电压的瞬时值 (V)。

在国际单位制中，电压的单位为伏特，简称 V (伏)，将 1C (库仑) 正电荷从图 1-5 中 a 端移到 b 端，电场力做功为 1J (焦耳)，则 a、b 两点间电压为 1V (伏特)，即 $U_{ab} = 1V$ 。各种电压单位间的关系如下

$$1kV = 1000V$$

$$1V = 10^3mV = 10^6\mu V$$

2. 电压的实际方向 电压的实际方向规定：由高电位端指向低电位端。表示的方法如图 1-7 所示：

可用箭头表示，由高电位端指向低电位端；或用极性符号，“+”表示高电位，“-”表示低电位；也可用下标 a 表示高电位，b 表示低电位。

3. 电压的参考方向 与电流一样，各元件电压的实际方向往往也是难以事先判断出来的，所以在电路分析过程中也必须对其设定参考方向。电压参考方向与实际方向间的关系也同样由分析计算结果确定。结果值为正，说明参考方向与实际方向相同，否则相反。

参考方向是任意设定的，但为了分析计算方便起见，对同一个电路的无源元件往往将电流、电压设定相同的参考方向，即所谓关联的参考方向。如图 1-6 中， R_1 中电压与电流即为关联参考方向；而 R_2 中电压与电流即为非关联参考方向。

4. 电位 在电路计算中，电位是一个很重要的概念，引入电位后，可以简化计算、简化电路画法。在电子技术中，电路中电源经常是用电位形式给出的。电路中任一点的电位是指该点对参考点的电压降。所以，提到某点电位，必须首先选定参考点，规定参考点的电位为零，用图符 $\perp$ 表示，如图 1-7 所示的 d。比参考点高的电位为“+”，低电位为“-”。例如，若 c 点设为参考点，则 c 点电位，可表示为 $V_c = 0$ ，其余各点 $V_d = 6V$ ， $V_b = 4V$ ， $V_a = 8V$ ， $V_e = 2V$ ；两点的电位之差即为两点间的电压，如： $U_{ab} = V_a - V_b = 4V$ ，也可选 d 点为参考点，则： $V_d = 0V$ ， $V_b = -2V$ ， $V_a = 2V$ ， $V_c = -6V$ ， $V_e = -4V$ ， $U_{ab} = V_a - V_b = 4V$ 。

可见：参考点改变，各点电位也随之改变；不论参考点如何改变，两点间的电位差（即电压）并不改变，例如 U_{ab} 就是 4 伏，余者可自行验算。

1.2.2.2 电动势

在图 1-5 中电场力做功使电路中有电流通过，为了维持电路中持续不断的电流通过，在电池 E 内部必须要克服电场力把正电荷从低电位移向高电位，即非电场力做功。为了衡量非电场力对电荷做功的能力，引入电动势这一物理量。其定义为：电源电动势 E (E_{ba}) 在数值上等于非电场力把单位正电荷 Q 从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所作的功 E 。

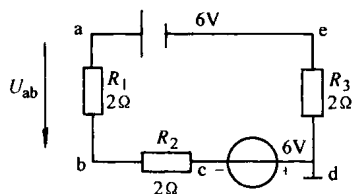


图 1-7 电压及电位的表示

表示为

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-6)$$

与式(1-3)比较,可见,其表达式中等号右边是相同的,因此两点间电动势的数值和电压降数值及单位是完全相同的,等号左边则表明了两者方向刚好相反。这是因为在电源内部是非电场力将正电荷从电源负极移到正极作功,是将非电能转化为电能,使正电荷获得电能而电位升高。因此,电动势的实际方向是负极指向正极,即电位升高的方向。电源内部电流从低电位流向高电位,而电源外部即外电路的电流是高电位流向低电位。所以,电源一旦接通,电路中电流就能连续不断。电动势的实际方向在很多情况下是已知的,这时一样可以把它认定为参考方向,如果实际方向未知或是交流电源的电动势,也可以和电压、电流一样设定参考方向,再从分析计算的结果得到实际的方向。

总之,在今后的电路分析中,电流、电压、电动势都要求标明方向。而且,不论已知的还是自己设定的可一律看作参考方向。

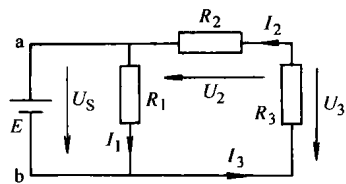


图 1-8 例 1 图

例 1 图 1-8 所示电路中,已知电动势 $E = -10\text{V}$, $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = R_3 = 5\Omega$ 。求 E 、 U 、 I_1 、 I_2 、 I_3 、 U_2 、 U_3 。

解 按设定参考方向, E 是由低到高,与实际方向相反,故从 a 到 b 为电压降 $E = -10\text{V}$ $U_S = 10\text{V}$ U 与实际电压极性相同。

$I_1 = 2\text{A}$ 与 U_S 参考方向相同,为关联参考方向。

$I_2 = -1\text{A}$ 与 U 为非关联参考方向。

$U_2 = -5\text{V}$

$U_3 = 5\text{V}$ $I_3 = I_2 = -1\text{A}$ I_3 、 U_3 为非关联参考方向。

可见,电阻元件当 I 与 U 取关联参考方向时,结果的符号相同;取非关联参考方向时, U 与 I 的符号相异。

电源的数值可以用电动势 E 表示,也可以用端电压 U 表示。若二者取相同的参考方向时,则 $U = -E$,若取相反参考方向时,则 $U = E$,这是因为电动势 E 的参考方向表示电位升高,而端电压 U 的参考方向表示电位降低的缘故。这两种表示对外电路的作用是等效的。

1.2.3 电功率

一个元件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。元件上的电功率有的是发出的,有的是吸收的,如何确定是哪种呢?以图 1-9 电路为例来分析,由此了解确定和计算的方法。图示为简单电路,很容易确定两个元件(电源与负载电阻 R)上电压与电流的实际方向。可以看出,消耗功率的元件 R 上 U 与 I 实际方向相同,其乘积大于 0;而发出功率的电源 E , U 与 I 实际方向相反,其乘积小于 0。

但通常在进行电路分析时, U 与 I 均采用参考方向(正方向),这时,可按下面的两点规定来确定元件的功率:

1. 由 U 、 I 的参考方向确定公式的符号:

(1) 当 U 与 I 选相同(关联)正方向时

$$P = UI \quad (\text{或 } p = ui)$$

(1-7)

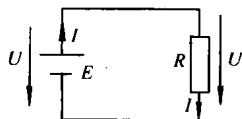


图 1-9 电路功率
计算图示

(2) 若 U 与 I 选不同 (非关联) 正方向时

$$P = -UI \quad (\text{或 } p = -ui) \quad (1-8)$$

式中 R ——功率 (W);

U ——电压 (V);

I ——电流 (A)。

2. 将已知电压 $U(u)$ 和电流 $I(i)$ 的数值及符号代入式 (1-7) 或式 (1-8) 中得到计算结果。

若计算结果 $P > 0$, 表明该元件是吸收 (或消耗) 功率的元件;
若 $P < 0$, 则该元件是发出功率的元件。

例 2 求图 1-10 中各元件消耗的功率。

解 电动势 E_1 消耗的功率

$$P_{E_1} = -U_1 I = -10\text{V} \times 1\text{A} = -10\text{W} < 0$$

电动势 E_2 消耗的功率

$$P_{E_2} = U_2 I = 5\text{V} \times 1\text{A} = 5\text{W} > 0$$

电阻 R 消耗的功率

$$P_R = -IU \text{ 而 } U = -IR = -1\text{A} \times 5\Omega = -5\text{V}$$

故

$$P_R = -IU = -1\text{A} \times (-5)\text{V} = 5\text{W} > 0$$

结果表明: 电动势 E_1 消耗功率为 -10W , 即发出 10W 功率, 是电路中的电源 (电能的施主); 电动势 E_2 消耗功率 5W , 是电路负载 (电能的得主); 电阻 R 消耗功率 5W 。可以看出:

(1) 消耗功率 $5\text{W} + 5\text{W} = 10\text{W}$, 发出功率也为 10W , 此谓功率平衡。可以此检验电路计算结果是否正确。

(2) 电阻上消耗功率总是大于 0, 计算时可以按下式进行

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

1.3 欧姆定律

欧姆定律 (OL) 是电路的基本定律之一, 是用于描述线性电阻伏安特性的关系式。所谓线性电阻是指其阻值不随两端电压或流过其中的电流数值而变化的电阻。今后, 如果没有特殊说明, 电阻均认为是线性的。

欧姆定律表明, 流过电阻 R 的电流与电阻两端电压 U 成正比。其数学表达式为:

$$I = \frac{U}{R}$$

$$U = IR$$

$$R = \frac{U}{I}$$

对于图 1-11b, 则欧姆定律应表示为

$$I = -\frac{U}{R}$$

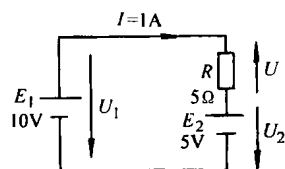


图 1-10 例 2 图

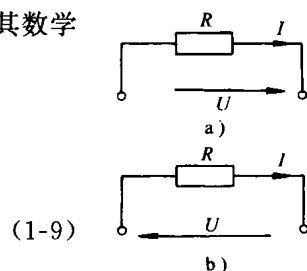


图 1-11 欧姆定律图示

(1-9)

(1-10)

即当电阻上电压与电流取关联参考方向时, 欧姆定律形式为式(1-9), 电压与电流取非关联参考方向时应写作式(1-10)。

在国际单位制中, 电阻的单位为欧姆(Ω), 简称欧, 若电阻两端加上 1V 的电压, 流过其中的电流是 1A, 则表明该电阻的阻值为 1Ω 。经常使用的电阻单位及其关系为

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$$

例 3 已知图 1-12 电路中, 电阻 $R=10\Omega$, 电压 $U=20\text{V}$, (1) 求 I ; (2) 若电流参考方向如虚线箭头所示, 则求电流 I 。

解 (1) U 与 I 参考方向相反 (非关联)

$$I = -U/R = -20\text{V}/10\Omega = -2\text{A}$$

(2) U 与 I 参考方向相同 (关联)

$$I = U/R = 20\text{V}/10\Omega = 2\text{A}$$

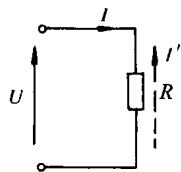


图 1-12 例 3 图

1.4 电路的工作状态

电源、负载通过中间环节接成电路, 由于中间环节的控制作用, 电路可能处于通路 (有载)、开路 and 短路三种不同的工作状态。

1.4.1 有载工作状态

当开关闭合, 电源与负载接通, 称电路处于有载工作状态, 此时电路中有电流通过, 如图 1-13a 所示。

电路中 E 为电源电动势, R_0 为电源的内电阻, 通常内阻 R_0 很小, R_L 为负载电阻。此时, 电路中, 也是负载中的电流 I 可由下式决定

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-11)$$

负载的端电压

$$U_L = IR_L = E - IR_0 \quad (1-12)$$

可见, 负载端电压与电源内阻有关, 内阻越大、负载电流越大, 则负载端电压 U_L 就越低。将式 (1-12) 两边同乘以电流 I , 则得到各部分功率的关系:

$$U_L I = EI - I^2 R_0$$

即

$$P_{R_L} = P_E - P_{R_0} \quad (1-13)$$

其中 P_{R_L} 为负载消耗的功率, 与内阻 R_0 上消耗功率之和应与电源发出的功率相平衡。

总之, 在有载工作状态下, 电路中电流 $I \neq 0$, 负载端电压 $U_L < E$, 电源产生的功率取决

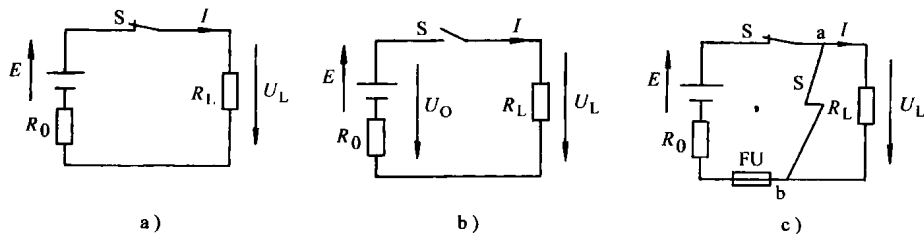


图 1-13 电路工作状态

a) 负载 b) 开路 c) 短路

于负载电流的大小。这是电路经常保持的工作状态。

1.4.2 开路

当S断开,电源未与负载接通,称电路所处的状态为开路状态,也称空载状态,如图1-13b所示。

由于电路未构成闭合回路,电路中电流 $I=0$,负载端电压 $U_L=0$,电源端电压 U_0 称为开路电压, $U_0=E$,即电源的开路电压等于电源的电动势 E ,此时,电路中各元件上的功率均为0。

1.4.3 短路与短接

1.4.3.1 短路

若电源a、b端不经负载 R_L 而直接由导线连接构成回路称为短路,如图1-13c所示。短路是非正常的工作状态,通常是由负载或电路某部分故障所致。由于a、b端导线的电阻值极小(可看作0),通过电源的电流

$$I = \frac{E}{R_0} = I_{sc} \quad (1-14)$$

I_{sc} 称为短路电流,一般电源内阻 R_0 也很小,所以短路电流很大,会在短时间内烧毁设备。电路对此所采取的保护措施是在电源的开关后安装熔断器。在电路出现短路故障时,熔断器熔断,以迅速切除故障点,保护电源设备。

短路时,短路电流 $I_{sc}=E/R_0$;负载端电压 $U_L=0$,故负载端功率 $P_{RL}=0$,电源产生的功率全部消耗在内阻上,即

$$P_E = EI = I^2 R_0 \quad (1-15)$$

1.4.3.2 短接

短接通常不是故障,是为了某种需要人为地将某元件的两端或部分予以短接,见图1-14。

图1-14a将 R_1 短接,相当将 R_1 去掉。而图1-14b是通过移动箭头位置改变 R_1 大小,从而使电路 I 可调。这种通过短接其中一部分或全部,使其成为一个阻值可调的电阻,称为电位器。

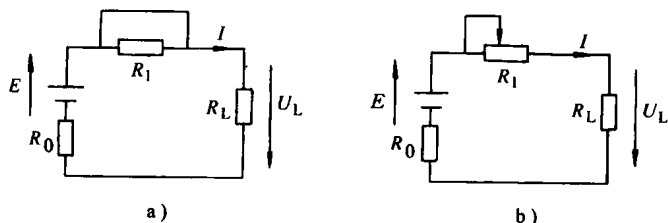


图1-14 短接全部或部分电阻

a) 全部 b) 部分

例4 电路如图1-15所示,已知 $E=50V$, $R_0=0.5\Omega$, $R_L=24.5\Omega$ 。

求(1)电路中S合上时, I 、 U_L 及各元件的功率。(2)S断开时, I 、 U_L 及各元件的功率。(3)S合上,a、b端短路时, I 、 U_L 及各元件的功率。

解 (1) S合上,电路为有载工作状态

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{50V}{0.5\Omega + 24.5\Omega} = 2A$$

$$U_L = E - IR_0 = 50V - 2A \times 0.5\Omega = 49V$$

$$P_E = -EI = -50V \times 2A = -100W \text{ (发出)}$$

$$P_{RL} = IU_L = 2A \times 49V = 98W \text{ (吸收)}$$

$$P_{R_0} = I^2 R_0 = (2A)^2 \times 0.5\Omega = 2W \text{ (吸收)}$$

(2) S 断开, 电路为空载状态

$$I=0 \quad U_L=0 \quad U_0=E=50\text{V}$$

$$P_E=P_{R_L}=P_{R_0}=0$$

(3) 电路为短路状态

$$U_L=0 \quad P_{R_L}=0 \quad I'=I_S=-E/R_0=50\text{V}/0.5\Omega=100\text{A}$$

$$P_E=-EI_S=-50\text{V}\times 100\text{A}=-5000\text{W}$$

$$P_{R_0}=I_S^2 R_0=(100\text{A})^2\times 0.5\Omega=5000\text{W}$$

但是, 在电路中, 安装了熔断器 FU, 当 a、b 端短路时, 过大的电流 I_S 将熔断 FU, 使电源与短路点断开, 而成为断路状态。

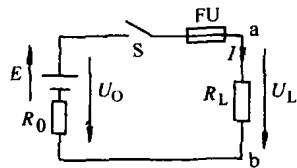


图 1-15 例 4 图

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律曾称克希荷夫定律。该定律包括基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL) 两部分。这两个定律既适用于线性直流电路、交流电路, 也适用于非线性电路。与欧姆定律一起成为电路分析的三个主要定律。在具体介绍定律之前, 先解释几个有关名词及术语。

1. 支路 二端元件或若干二端元件串联组成的不分岔的一段电路称为支路。在图 1-16 中, 三条支路分别为 acd、abd 和 ad, 前两条为有源支路, ad 为无源支路。

2. 节点 三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1-16 中, a、d 为节点。

3. 回路 由支路构成的闭合路径称为回路。在图 1-16 中, 有 acdba、acda、abda 三个回路。

4. 网孔 内部不含有其它支路的回路称为网孔。上面三回路中的 acda、abda 为网孔。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

1.5.1.1 内容

基尔霍夫电流定律是确定 (或约束) 电路中节点处各支路电流之间关系的定律。该定律指出: 任一瞬间, 流入电路任一节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。可写作

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad (1-16)$$

如果将节点各支路电流中流入和流出的分别设定为“+”和“-”, 则该定律也可以叙述为: 任一时刻, 电路任一节点电流的代数之和为 0。其数学表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-17)$$

两种表示方法显示节点的电流间关系是一致的, 即是电流连续性原理的体现。

在图 1-16 中节点 a 按 $\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}}$

有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或按 $\sum I = 0$

则有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

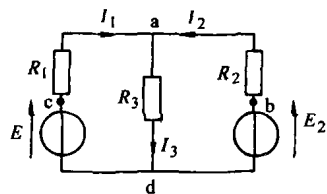


图 1-16 基尔霍夫电流定律

1.5.1.2 应用时注意的问题

(1) 从 KCL 内容的数学描述中可以看出: 表达式中电流要有确定的方向。所以在应用