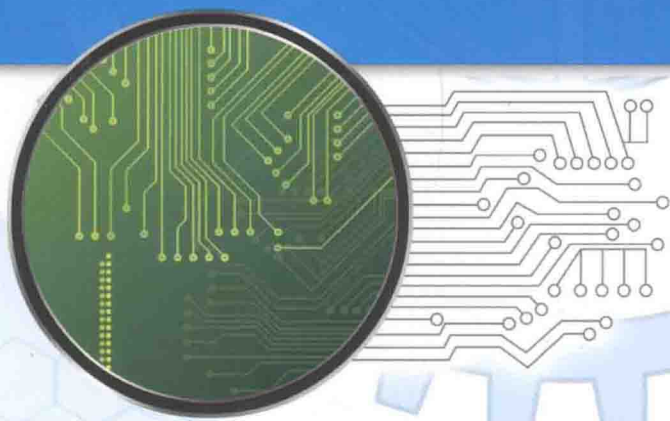




全国职业教育“十二五”精品教材

电工电子技术

主编 谷立新 齐俊平



航空工业出版社

全国职业教育“十二五”精品教材

电工电子技术

主 编 谷立新 齐俊平



航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书共分 15 章,包括电工和电子技术两部分。其中,电工部分包括直流电路、正弦交流电路、三相交流电路、电路的暂态分析、磁路与变压器、异步电动机、继电接触器控制系统、安全用电;电子技术部分包括常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路。

本书可作为高职高专院校理工科各专业的电工电子技术课程教材,也可供有关专业师生和工程技术人员自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术 / 谷立新, 齐俊平主编. — 北京 :
航空工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-80243-802-6

I. ①电… II. ①谷… ②齐… III. ①电工技术②电
子技术 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 150581 号

电工电子技术
Diangong Dianzi Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京忠信印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2011 年 8 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787×1092

1/16

印张: 24.25

字数: 605 千字

印数: 1—3000

定价: 48.00 元



电工电子技术是理工科非电类专业的一门重要技术基础课,它具有技术性强、实用性强的特点。本书是以国务院《关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定》和教育部关于《高职高专教育基础课程教学基本要求》为依据编写的,它以培养技术应用型人才为根本任务,以基础知识、基本概念、基本定律为主要编写原则,以“必须”和“够用”为准则来选择和编写内容。

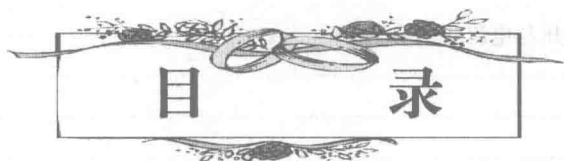
本书具有以下几个鲜明的特点。

1. 本书以培养应用型工程技术人才为目标,实用性强,适合高职教育的特点。本书注重将理论讲授与实践训练相结合,以讲授基本技能和应用为主,易学易懂易上手。
2. 本书在内容讲解中,对与后续课程联系不大及不必要的理论推导进行了较为合理的简化;在典型电路的分析中,对计算过程进行了弱化,尽量不做繁杂的理论推导,只给出定性或定量的结论。
3. 本书共有二十个验证性基础实验和设计实验,在培养学生综合运用所学知识分析问题和解决问题能力的同时,可激发学生的创新思维 and 创新能力,同时还可锻炼学生的动手能力。
4. 本书在每章前都有本章导读和本章学习目标,每章后都有本章小结和习题,从而为指导学生学习和检查学生学习效果提供便利。
5. 书中标有*的内容供学生深入学习之用,教师可根据情况选讲。

总体而言,本书结构清晰、内容完整、重点突出、语言通俗易懂,在讲解上由浅入深、由易到难、循序渐进,具有较强的可读性。

本书可作为高职高专理工科相关专业的基础课教材。本书由谷立新、齐俊平任主编,由刘琳、劳胜领、董会锦、张新华任副主编。在编写本书的过程中,编者翻阅了大量有关电工电子技术的资料和教材,在此,对这些资料的作者和编者表示衷心的感谢。由于时间仓促,编写人员水平有限,书中不尽如人意之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者
2011年8月



第1章 直流电路	1
1.1 电路的基础知识	1
1.1.1 电路模型	1
1.1.2 电路的基本物理量	2
1.1.3 电路的工作状态	5
1.1.4 电阻元件、电感元件及电容元件	8
1.1.5 电阻的串联与并联	10
1.1.6 电压源与电流源	12
1.2 基尔霍夫定律	16
1.2.1 电路中的几个名词	16
1.2.2 基尔霍夫电流定律	16
1.2.3 基尔霍夫电压定律	18
1.3 电路的分析方法	19
1.3.1 支路电流法	19
1.3.2 叠加定理	21
1.3.3 戴维南定理	23
1.4 实验	24
1.4.1 实验预备知识	24
1.4.2 实验一 电阻的认识和测量	29
1.4.3 实验二 基尔霍夫定律和叠加定理的验证	30
1.4.4 实验三 戴维南定理的验证	32
本章小结	33
思考与练习	34
第2章 正弦交流电路	37
2.1 正弦交流电的基础知识	37
2.1.1 正弦量的三要素	37
2.1.2 正弦量的相量表示	40
2.2 单一参数的正弦交流电路	44
2.2.1 电阻元件的正弦交流电路	44
2.2.2 电感元件的正弦交流电路	45
2.2.3 电容元件的正弦交流电路	48
2.3 基尔霍夫定律的相量表示	51
2.4 RLC 正弦交流电路	51



2.4.1 RLC 串联电路电压与电流的关系	51
2.4.2 功率	53
2.4.3 功率因数的提高	55
2.5 电路中的谐振	57
2.5.1 RLC 串联谐振	57
2.5.2 RLC 并联谐振	59
2.6 非正弦周期电路	61
2.7 实验	62
2.7.1 实验预备知识	62
2.7.2 实验四 单相交流电路及功率的测量	64
2.7.3 实验五 功率因数的提高	66
本章小结	67
思考与练习	69
第3章 三相电路	71
3.1 三相电源	71
3.1.1 三相交流电的产生	71
3.1.2 三相电源的连接	73
3.2 三相负载的连接	75
3.2.1 三相负载的星形连接	75
3.2.2 三相负载的三角形连接	79
3.3 三相交流电路的功率	80
3.4 实验	81
3.4.1 三相交流电路功率的测量方法	81
3.4.2 实验六 三相交流电路功率的测量	83
本章小结	84
思考与练习	85
第4章 电路的暂态分析	87
4.1 动态电路	87
4.1.1 换路定则	87
4.1.2 初始值的计算	88
4.2 RC 电路的暂态分析	89
4.2.1 RC 电路的零状态响应	89
4.2.2 RC 电路的零输入响应	90
4.2.3 RC 电路的全响应	91
4.3 RL 电路的暂态分析	93
4.3.1 RL 电路的零状态响应	93
4.3.2 RL 电路的零输入响应	94
4.3.3 RL 电路的全响应	94
本章小结	96



思考与练习	96
第5章 磁路与变压器	98
5.1 磁路的基本知识	98
5.1.1 磁场的基本物理量	98
5.1.2 铁磁性材料	99
5.1.3 磁路及其基本定律	102
5.2 交流铁芯线圈电路	104
5.2.1 电磁关系	104
5.2.2 电压电流关系	105
5.2.3 功率损耗	105
5.3 变压器	106
5.3.1 变压器的分类	106
5.3.2 变压器的结构	106
5.3.3 变压器的工作原理	107
5.3.4 变压器绕组的极性	110
5.3.5 变压器的额定值及运行特性	111
5.3.6 特殊变压器	114
5.4 实验	116
5.4.1 实验七 变压器及其参数测量	116
本章小结	118
思考与练习	119
第6章 异步电动机	120
6.1 三相异步电动机的结构及工作原理	120
6.1.1 三相异步电动机的基本结构	120
6.1.2 三相异步电动机的工作原理	122
6.2 三相异步电动机的工作特性	126
6.2.1 铭牌数据	126
6.2.2 电磁转矩	127
6.2.3 机械特性	129
6.3 三相异步电动机的启动、调速和制动	133
6.3.1 三相异步电动机的启动	133
6.3.2 三相异步电动机的调速	136
6.3.3 三相异步电动机的制动	137
6.4 单相异步电动机	138
6.4.1 单相异步电动机的工作原理	138
6.4.2 单相异步电动机的结构	139
本章小结	140
思考与练习	141



第7章 继电器接触器控制系统	143
7.1 常用低压电器	143
7.1.1 刀开关	143
7.1.2 按钮	145
7.1.3 熔断器	146
7.1.4 接触器	147
7.1.5 继电器	148
7.1.6 行程开关	150
7.1.7 断路器	151
7.2 三相异步电动机的基本控制电路	152
7.2.1 单向控制电路	152
7.2.2 点动控制电路	153
7.2.3 正反转控制电路	154
7.2.4 行程控制电路	155
7.2.5 顺序控制电路	157
7.2.6 时间控制电路	157
7.2.7 速度控制电路	158
7.3 电气图的绘制及分析实例	159
7.3.1 绘制及分析电气图时应遵循的原则	159
7.3.2 电气图的分析实例	159
7.4 实验	160
7.4.1 实验八 三相鼠笼式异步电动机的点动和自锁控制	160
7.4.2 实验九 三相鼠笼式异步电动机的正反转控制	161
7.4.3 实验十 三相鼠笼式异步电动机的降压启动控制	164
本章小结	165
思考与练习	165
第8章 安全用电*	167
8.1 电力系统简介	167
8.1.1 发电	167
8.1.2 输电	168
8.1.3 配电	168
8.2 安全用电技术	169
8.2.1 触电	170
8.2.2 触电方式	170
8.2.3 触电预防措施	172
8.2.4 安全用电措施	173
8.3 触电急救	174
8.3.1 脱离电源	174
8.3.2 急救处理	174



本章小结	175
思考与练习	175
第 9 章 常用半导体器件	177
9.1 半导体基础知识	177
9.1.1 半导体的基本特性	177
9.1.2 本征半导体和杂质半导体	178
9.1.3 PN 结	179
9.2 半导体二极管	181
9.2.1 二极管的结构和类型	181
9.2.2 二极管的特性	182
9.2.3 二极管的主要参数	183
9.2.4 特殊二极管	183
9.3 半导体三极管	185
9.3.1 三极管的结构	185
9.3.2 三极管的类型	186
9.3.3 三极管的电流分配与放大原理	186
9.3.4 三极管的特性曲线	189
9.3.5 三极管的主要参数	191
9.4 场效应晶体管*	192
9.4.1 场效应管的结构	192
9.4.2 MOS 管的工作原理	193
9.4.3 MOS 管的特性曲线	195
9.4.4 场效应管与三极管的比较	196
9.4.5 场效应管的使用注意事项	196
9.5 实验	197
9.5.1 实验十一 常用电子器件的测量	197
本章小结	199
思考与练习	200
第 10 章 基本放大电路	202
10.1 放大电路基础知识	202
10.1.1 共射极基本放大电路的组成	202
10.1.2 放大电路中电压、电流符号的规定	203
10.2 放大电路的分析	203
10.2.1 静态分析	204
10.2.2 动态分析	206
10.3 射极输出器	211
10.3.1 静态分析	211
10.3.2 动态分析	212
10.4 场效应管放大电路	213



10.5	多级放大电路	214
10.5.1	多级放大电路的组成	215
10.5.2	多级放大电路的耦合方式	215
10.5.3	多级放大电路的分析	217
10.5.4	放大倍数的分贝表示法	217
10.6	差动放大电路	217
10.6.1	概 述	217
10.6.2	差动放大电路的分析	218
10.7	功率放大电路	220
10.7.1	功率放大电路概述	220
10.7.2	互补对称功率放大电路	221
10.8	实验	223
10.8.1	实验十二 单管电压放大电路的组装与调试	223
	本章小结	226
	思考与练习	227
第 11 章	集成运算放大器	230
11.1	集成运算放大器概述	230
11.1.1	集成运算放大器的基本组成	230
11.1.2	集成运算放大器的符号	231
11.1.3	集成运算放大器的主要性能指标	232
11.1.4	集成运算放大器的理想模型	233
11.2	放大电路中的负反馈	234
11.2.1	反馈的类型及判别方法	235
11.2.2	负反馈放大电路的一般表达式	237
11.2.3	深度负反馈放大电路的特点	237
11.2.4	四种负反馈组态的分析	238
11.2.5	负反馈对放大电路性能的影响	240
11.3	集成运算放大器的线性应用	242
11.3.1	比例运算电路	242
11.3.2	加法运算电路	244
11.3.3	减法运算电路	246
11.3.4	积分运算电路	247
11.3.5	微分运算电路	247
11.4	集成运算放大器的非线性应用	248
11.4.1	过零比较器	249
11.4.2	滞回比较器	250
11.5	实验	250
11.5.1	实验十三 负反馈放大电路	250
11.5.2	实验十四 集成运算放大器的性能指标测试	252



本章小结	254
思考与练习	255
第 12 章 直流稳压电源	258
12.1 单相整流电路	258
12.1.1 单相半波整流电路	259
12.1.2 单相桥式整流电路	260
12.2 滤波电路	263
12.2.1 电容滤波电路	263
12.2.2 其他滤波电路	265
12.3 直流稳压电路	267
12.3.1 稳压管稳压电路	267
12.3.2 串联型稳压电路	268
12.3.3 三端集成稳压器	270
12.4 实验	273
12.4.1 实验十五 桥式整流、滤波及三端稳压电路	273
本章小结	275
思考与练习	276
第 13 章 逻辑门电路	279
13.1 数字电路概述	279
13.2 数制与编码	280
13.2.1 数 制	281
13.2.2 数制转换	282
13.2.3 编 码	284
13.3 逻辑代数及应用	285
13.3.1 逻辑运算	285
13.3.2 逻辑代数的基本公式和基本定理	288
13.3.3 逻辑函数及其表示方法	289
13.3.4 逻辑函数的化简	292
13.4 二极管和三极管的开关作用	299
13.4.1 二极管的开关作用	299
13.4.2 三极管的开关作用	299
13.5 逻辑门电路	300
13.5.1 基本逻辑门电路	301
13.5.2 TTL 与非门电路	303
13.6 实验	307
13.6.1 实验十六 TTL 与非门参数的测试	307
本章小结	310
思考与练习	311



第 14 章 组合逻辑电路	312
14.1 组合逻辑电路的分析与设计	312
14.1.1 组合逻辑电路的分析方法	312
14.1.2 组合逻辑电路的设计方法	313
14.2 常用组合逻辑器件	315
14.2.1 编码器	315
14.2.2 译码器	317
14.2.3 加法器	322
14.2.4 数据选择器	325
14.2.5 数值比较器	327
14.3 实验	329
14.3.1 实验十七 编码器、译码器的应用	329
本章小结	330
思考与练习	330
第 15 章 触发器和时序逻辑电路	333
15.1 触发器	333
15.1.1 RS 触发器	333
15.1.2 JK 触发器	336
15.1.3 D 触发器	337
15.1.4 T 触发器	338
15.2 时序逻辑电路的分析和设计	338
15.2.1 时序逻辑电路的分析方法	338
15.2.2 时序逻辑电路的设计方法	342
15.3 常用时序逻辑功能器件	343
15.3.1 寄存器	343
15.3.2 计数器	344
15.4 555 定时器*	352
15.4.1 555 定时器的结构	352
15.4.2 555 定时器的工作原理	353
15.4.3 555 定时器的典型应用	354
15.5 D/A 和 A/D 转换器*	358
15.5.1 D/A 转换器 (DAC)	359
15.5.2 A/D 转换器	363
15.6 实验	366
15.6.1 实验十八 触发器逻辑功能测试	366
本章小结	370
思考与练习	371
参考文献	373

第1章 直流电路

【本章导读】

电路是电工技术和电子技术的基础,它可分为直流电路和交流电路。本章将主要介绍直流电路中的定律及常用的电路分析方法。由于在辅以适当的数学工具后,这些定律及分析方法也可适用于正弦交流电路及其他各种线性电路,因此,直流电路是电路分析研究的基础。

【本章学习目标】

- ◆ 理解电路的组成及电路模型的概念
- ◆ 掌握电流和电压的参考方向
- ◆ 掌握电路的三种工作状态
- ◆ 理解电阻元件、电感元件及电容元件的相关知识
- ◆ 掌握电阻的串联与并联
- ◆ 掌握电压源与电流源的等效变换
- ◆ 掌握基尔霍夫电流定律和电压定律
- ◆ 会应用支路电流法、叠加定理、戴维南定理、电压源和电流源的等效变换等方法求解电路

1.1 电路的基础知识

电路是电流的通路,它是由电源、负载和中间环节三部分按一定方式组合而成的。其中,电源是指能将其他形式的能量转换成电能并为电路提供能量的装置,如干电池、蓄电池及发电机等;负载是指可在电路中接收电能并将电能转换成其他形式的能量的设备,如电灯、电视机及电炉等;中间环节是指连接电源和负载的部分,如导线、开关及各种继电器等。

实际应用中,电路的种类繁多,形式和结构也各不相同,但就其作用而言,主要可概括为以下两方面:① 实现电能的传输、分配和转换。例如,照明电路中,电源通过导线将电能传递给电灯,电灯再将电能转换为光能和热能;② 实现信号的传递和处理。例如,电视机或收音机将接收到的电信号经过调频、滤波和放大等环节处理后,转换为图像和声音信号。

1.1.1 电路模型

实际电路是由各种作用不同的电路元件组成的,而实际的电路元件在工作时的电磁性质往往比较复杂,大多数电路元件都具有多种电磁性质。因此,为了方便对实际电路进行分析和研究,通常将实际电路元件理想化(模型化),突出其主要电磁性质,忽略次要性质,近



似看作理想电路元件。例如,电阻元件、电感元件和电容元件等都是理想电路元件。

由理想电路元件组成的电路称为实际电路的电路模型。如图 1-1 所示,干电池在对外提供电压的同时,其内部也有电阻消耗能量,故在电路模型中可用电动势 E 和内阻 R_0 串联表示;灯泡在通电流时,除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,还具有电感性,但由于其电感性很弱,可忽略不计,故在电路模型中可用一电阻元件 R 表示;导线的电阻很小,可忽略不计,故在电路模型中可看作是一无电阻的理想导体。本书所分析的电路都是电路模型。

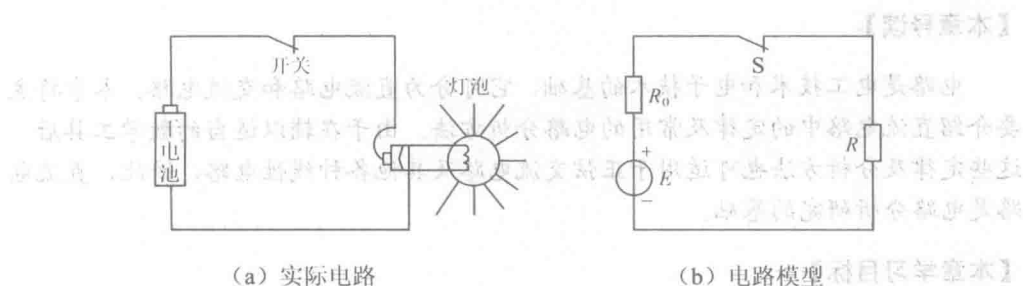


图 1-1 电路模型

1.1.2 电路的基本物理量

在分析各种电路之前,首先需介绍一下电路的基本物理量:电流、电压、电动势和功率。

1. 电 流

在电场力的作用下,电荷有规则地定向移动就形成了电流。习惯上规定电流的方向为正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向,它是客观存在的,称为电流的实际方向。电流的大小为单位时间内通过导体横截面的电量,称为电流强度,简称电流,用 i 表示,即:

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

式中: dq —— dt 时间内通过导体横截面的电量,单位为 C。

小写字母 i 表示电流随时间变化。大小和方向都不随时间变化的电流称为直流电流,用大写字母 I 表示,于是,式 (1-1) 可写为:

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

在国际单位制中,电流的单位为安培(A)。常用的电流单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)。

在分析简单电路时,可以直观地确定电流的实际方向,但在分析复杂电路时,往往很难判断电流的实际方向。因此,为了方便分析和计算,可以任意选定一个方向作为参考方向,如图 1-2 所示,若电流的实际方向与参考方向一致,则电流为正值;若电流的实际方向与参考方向相反,则电流为负值。

电流的参考方向可以用箭头表示,也可以用双下标表示。例如, i_{ab} 表示电流的参考方向是从 a 指向 b 的。

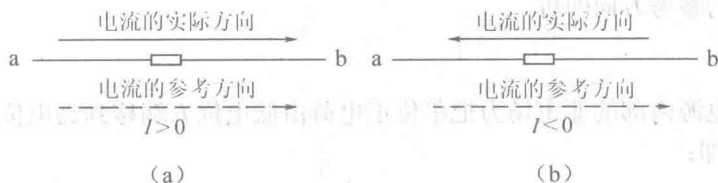


图 1-2 电流的方向

2. 电 压

在介绍电压之前,我们首先要了解一下电位的概念。在电路中任选一点作为参考点,则电场力把单位正电荷从某点移动到参考点所做的功称为该点的电位,用 v (V) 表示。

电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功称为 a 、 b 两点间的电压,用 u_{ab} (U_{ab}) 表示,即:

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中: dw ——电场力将 dq 的正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功,单位为 J。

习惯上规定电压的实际方向为高电位 (“+” 极性) 端指向低电位 (“-” 极性) 端,即电位降低的方向。因此,电路中两点间的电压也可用两点间的电位差来表示,即:

$$u_{ab} = v_a - v_b \quad (1-4)$$

在国际单位制中,电位和电压的单位相同,都为伏特 (V)。常用的电压单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μ V)。

电路中两点间的电压是不变的,而各点的电位则随参考点的不同而不同。因此,在研究同一电路系统时,只能选取一个电位参考点。

与电流类似,分析电路时,也需先任意选定一个方向作为参考方向,如图 1-3 所示。若电压的实际方向与参考方向一致,则电压为正值;若电压的实际方向与参考方向相反,则电压为负值。

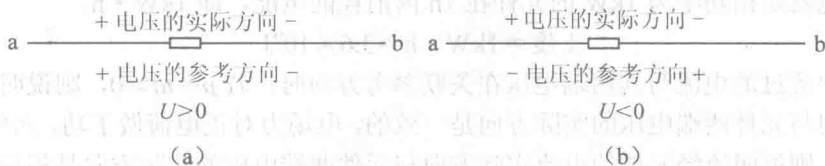


图 1-3 电压的方向

电压的参考方向可以用箭头表示,也可以用 “+”、“-” 表示,还可以用双下标表示。

在分析计算电路时,必须首先标出电流、电压的参考方向。参考方向一经选定,在分析电路过程中就不能再变动,并以此标准进行分析计算,最后根据答案的正负来确定电流和电压的实际方向。本书中在电路图上所标出的电流和电压方向均为参考方向。

一般来说,同一段电路上电流和电压的参考方向彼此独立无关,可以各自选定。但为了方便分析,通常将电流和电压的参考方向选得一致,称为关联参考方向。这时,只需标出电



流或电压中一个的参考方向即可。

3. 电动势

电动势是指电源内部的非电场力把单位正电荷由低电位 b 端移到高电位 a 端所做的功, 用 e (E) 表示, 即:

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

电动势的实际方向为由低电位端指向高电位端, 即电位升高的方向, 因此, 电动势和电压的实际方向相反, 如图 1-4 (a) 所示。在开路情况下, 电源电动势与电源两端的电压大小相等, 方向相反, 如图 1-4 (b) 所示。

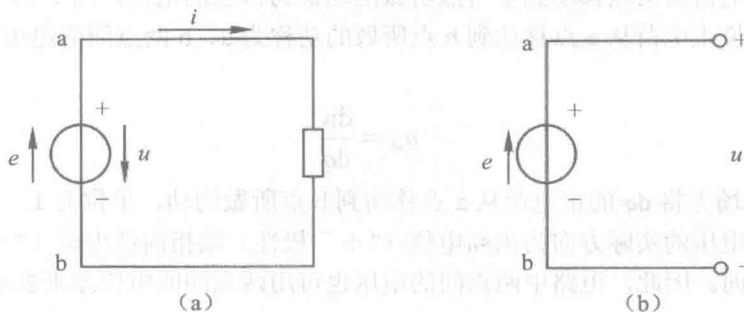


图 1-4 电动势

4. 功率

功率是指电能对时间的变化率, 也就是电场力在单位时间内所做的功, 用 p (P) 表示, 即:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 功率的单位为瓦特 (W)。常用的功率单位为千瓦 (kW)。日常生活中所说的 1 度电就是指功率为 1kW 的元件在 1h 内消耗的电能, 即 1kW · h。

$$1 \text{ 度} = 1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

当元件中流过的电流与其两端电压在关联参考方向时, 若 $p = ui > 0$, 则说明流经元件的电流实际方向与元件两端电压的实际方向是一致的, 电场力对正电荷做了功, 元件吸收功率; 若 $p = ui < 0$, 则说明流经元件的电流实际方向与元件两端电压的实际方向是相反的, 一定有外力克服电场力做了功, 元件发出功率。当元件中流过的电流与其两端电压在非关联参考方向时, 上述结论正好相反。

电路元件在 $t_0 \sim t$ 时间内所消耗或提供的能量 W 为:

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-7)$$

直流时

$$W = P(t - t_0) \quad (1-8)$$



【例 1-1】如图 1-5 所示直流电路中， $U_1=4\text{V}$ ， $U_2=-8\text{V}$ ， $U_3=6\text{V}$ ， $I=4\text{A}$ ，求各电路元件吸收或发出的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 ，并求整段电路的功率 P 。

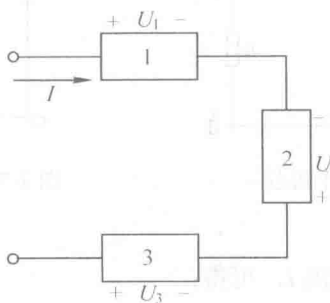


图 1-5 例 1-1 图

【解】对元件 1，其电流和电压为关联参考方向，且 $P_1=U_1I=4\times 4=16\text{ (W)}>0$ ，所以，元件 1 吸收功率 16W。

对元件 2，其电流和电压为非关联参考方向，且 $P_2=U_2I=-8\times 4=-32\text{ (W)}<0$ ，所以，元件 2 吸收功率 32W。

对元件 3，其电流和电压为非关联参考方向，且 $P_3=U_3I=6\times 4=24\text{ (W)}>0$ ，所以，元件 3 发出功率 24W。

设吸收功率为正，发出功率为负，则整段电路的功率 P 为：

$$P=16+32-24=24\text{ (W)}$$

1.1.3 电路的工作状态

在电源与负载通过中间环节连接成电路后，电路可能处于通路、开路和短路三种不同的工作状态。下面以简单直流电路为例来分析这三种工作状态。

1. 通路工作状态

如图 1-6 所示，将开关合上，接通电源与负载，电路即处于通路工作状态，又称为有载工作状态。

(1) 电压与电流的关系

根据欧姆定律可知，电路中的电流 I 为：

$$I=\frac{E}{R_0+R} \quad (1-9)$$

电源的输出电压 U 为负载 R 两端的电压，由式 (1-9) 和欧姆定律可得：

$$U=E-IR_0 \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可知，电源的输出电压 U 小于电动势 E ，两者之差为电流通过电源内阻所产生的电压降 IR_0 。电源的输出电压 U 与输出电流 I 之间的变化关系称为电源的外特性，其外特性曲线如图 1-7 所示。