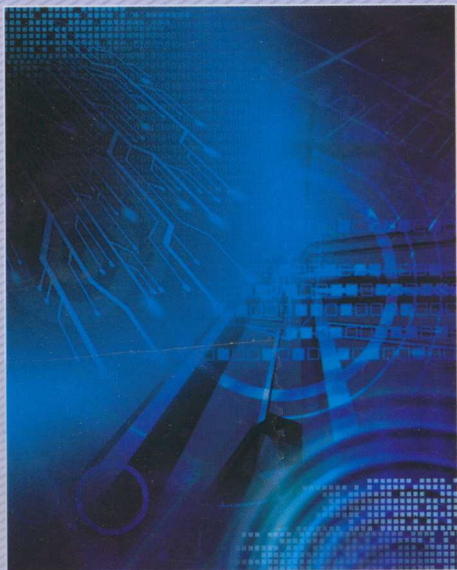


电工电子技术

DIANGONG DIANZI JISHU

■ 主 编 刘耀元

(第 3 版)



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

电工电子技术

(第3版)

主 编 刘耀元

副主编 廖海松 史先焄 田治礼

主 审 罗伟雄

本书根据国家规定的机电类电工电子技术课程教学大纲的要求和面向 21 世纪人才培养目标，在总结多年教学经验和教材建设成果的基础上，参考国内外优秀教材编写而成。本书可作为高等院校非电专业的一门技术基础课教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。本书力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进，注重工程应用能力的培养。全书共分 12 章，主要内容包括：电路的基本概念和基本定律、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、电动机、继电接触器控制线路、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、传感器与检测技术、单片机原理及应用、PLC 原理及应用、变频调速技术、电气控制系统的安装与调试。本书可作为高等院校非电专业的一门技术基础课教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

要学好“电工电子技术”课程，必须加强实践。本书每节后配有思考题、每章后有习题，部分习题可以在实验室进行验证。如能将理论预测与实验结果相比较，并作出一定的分析和解释，会取得很好的学习效果。

“电工电子技术”是工科院校非电专业的一门技术基础课，信息量大。其主要内容包括电路基础、电工测量、变压器、电动机、继电接触器控制线路、模拟电子技术基础、数字电子技术基础、传感器与检测技术、单片机原理及应用、PLC 原理及应用、变频调速技术、电气控制系统的安装与调试。

本书由刘耀元担任主编，廖海松、史先焄、田治礼担任副主编，罗伟雄担任主审。本书在编写过程中，参考了国内外许多优秀的教材和有关文献，并得到了许多同行专家的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

本书由刘耀元担任主审。在此谨向所有为本书的编写、出版给予支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

1233370

内 容 简 介

本教材根据教育部电工学课程指导组拟定的机械类电工电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教育教学改革目标而编写, 主要涵盖电路基本理论, 变压器与电机及其使用, 模拟电子技术基础和数字电子技术基础 4 个部分的基础知识。

全书共分 16 章, 主要内容包括: 直流电路, 正弦交流电路, 电路的暂态过程, 电工测量与工厂输配电和安全用电, 电磁铁和变压器, 电动机及其基本控制系统, 可编程序控制器, 常用晶体管, 基本放大电路, 集成运算放大电路, 直流稳压电路, 数字电路基础, 组合逻辑电路, 时序逻辑电路, 脉冲的产生和变换电路, 模 - 数和数 - 模转换器。各小节均配有思考与练习, 每章配有小结及习题, 便于自学。

本教材既适用于高等院校非电类专业学生使用, 也可供电子电气工程人员学习和参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术/刘耀元主编. —3 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 5640 - 9846 - 9

I. ①电… II. ①刘… III. ①电工技术 - 高等学校 - 教材②电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 238445 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京富达印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 26.5

字 数 / 627 千字

版 次 / 2014 年 11 月第 3 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 孟祥敬

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

本书根据国家教育部电工学课程指导组拟定的机械类电工电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教育教学改革目标而编写。在当前中国高等教育发展为技能型和学术型的大环境下, 编者在 2009 年 8 月第 2 版的基础上进行修订。

本书针对以往教材大多没有摆脱学术型教学模式的束缚、教学学时较多的问题而编写。本书为修订版, 内容结构更符合教学规律, 内容更加科学、严谨、合理。具体地说, 本书更加突出工程技术应用的基础知识与中高级技能应用关系, 以及知识与技能、理论与实践、通用知识与专业知识的关系, 强调“学而知其用”, 以“用”为目标, 淡化其内部机理, 回避深奥的理论分析、复杂的参数计算与公式推导等。

要学好“电工电子技术”课程, 必须通过解决一些实际问题来加强。本书每节后配有思考题、每章后有习题, 部分习题可以在理论分析与计算后, 到实验室进行实验, 如能将理论预测与实验结果相比较, 并作出一定的分析和解释, 会取得很好的学习效果。

“电工电子技术”是工科院校非电专业的一门技术基础课, 教学内容涵盖面广, 信息量大。其主要内容包括电路基础、电工测量、变压器、电机及其控制、常用晶体管、基本放大电路、集成运算放大电路、电源电路、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、555 定时电路等。

本书由刘耀元担任主编, 廖海松、史先焘、田治礼担任副主编。各章具体分工如下: 廖海松编写第 1、3 章, 周保森编写第 2、4 章, 田治礼编写第 5、7 章, 高鹏编写第 6 章, 史先焘编写第 8、13、14 章, 郑清生编写第 9 章, 罗慧勇编写第 10、11 章, 王芳编写第 12 章, 刘耀元编写第 15 章, 李元志编写第 16 章。最后由刘耀元负责统稿。

本书由罗伟雄教授主审; 在编写、整理和定稿过程中, 还得到了徐世廷、郭纪林教授的大力支持和许多同行的帮助, 在此谨向所有为本书的编审、出版给予支持和帮助的同志表示

诚挚的感谢!

由于电工电子技术学科发展迅速,课程改革日益深入,尽管我们精心组织编写,但时间仓促及编者水平有限,书中错误和欠妥之处在所难免,恳请广大读者不吝指教。编者电子邮箱:598211099@qq.com。

编者

目 录

7.2 PLC的基本结构及工作原理	177
7.3 FX _{2N} 系列PLC的I/O配置及内部软继电器	180
7.4 PLC的组合系统与典型应用	183
7.5 PLC控制系统应用案例	193
本章小结	196
习题	197
第8章 电机拖动	199
第1章 直流电路	1
1.1 电路及电路模型	1
1.2 电路主要物理量及电气设备的额定值	3
1.3 电路的三种工作状态	11
1.4 基尔霍夫定律	13
1.5 电路分析方法	17
本章小结	30
习题	31
第2章 正弦交流电路	36
2.1 正弦交流电的基本概念	36
2.2 正弦交流电的相量表示法	41
2.3 单一参数的正弦交流电路	45
2.4 正弦交流电路的分析	52
2.5 谐振电路	59
2.6 功率因数提高的意义和方法	62
2.7 三相交流电路	64
本章小结	73
习题	74
第3章 电路的暂态过程	77
3.1 电路的暂态过程及换路定律	77
3.2 RC电路的暂态过程及三要素法	80
3.3 微分电路和积分电路	84
3.4 RL电路的暂态过程	87
本章小结	91

习题	92
第4章 电工测量与工厂输配电和安全用电	94
4.1 测量误差与仪表准确度	94
4.2 常用电工测量仪表	96
4.3 电流、电压和电功率的测量	98
4.4 万用表和兆欧表	100
4.5 工厂输配电	104
4.6 安全用电	107
4.7 节约用电	112
本章小结	113
习题	114
第5章 电磁铁和变压器	115
5.1 磁路	115
5.2 电磁铁及其电磁电器	119
5.3 交流铁芯线圈电路	123
5.4 变压器的原理和应用	125
本章小结	133
习题	134
第6章 电动机及其基本控制系统	136
6.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	136
6.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路	142
6.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	145
6.4 三相异步电动机的使用	148
6.5 单相异步电动机	157
6.6 常用低压电器与电气符号	159
6.7 三相异步电动机的基本控制系统	164
本章小结	170
习题	172
第7章 可程序控制器	175
7.1 概述	175

7.2 PLC 的基本结构及工作原理	177
7.3 FX _{2N} 系列 PLC 的 I/O 配置及内部软继电器	180
7.4 PLC 的指令系统与编程语言	182
7.5 PLC 控制系统应用举例	193
本章小结	196
习题	197
第 8 章 常用晶体管	199
8.1 半导体基础知识	199
8.2 二极管	202
8.3 晶体管	206
8.4 绝缘栅场效应晶体管	211
8.5 晶闸管	214
本章小结	217
习题	218
第 9 章 基本放大电路	220
9.1 基本交流电压放大电路	220
9.2 分压式偏置电路	229
9.3 射极输出器	231
9.4 互补对称功率放大电路	234
9.5 多级放大电路	238
本章小结	240
习题	241
第 10 章 集成运算放大电路	245
10.1 集成运算放大器输入级——差动放大电路	245
10.2 集成运算放大器简介	249
10.3 集成运算放大器的线性应用电路	255
10.4 集成运算放大器的非线性应用电路	263
10.5 正弦波振荡电路	270
10.6 集成运算放大器应用的一些实际问题	274
本章小结	276

习题	277
第11章 直流稳压电路	282
11.1 直流电源的组成	282
11.2 单相桥式整流电路	283
11.3 滤波电路	285
11.4 稳压电路	289
11.5 可控整流电路	294
本章小结	296
习题	297
第12章 数字电路基础	299
12.1 数制与码制	299
12.2 逻辑代数基础	302
12.3 逻辑函数化简	309
12.4 分立元件门电路	315
12.5 集成门电路	318
本章小结	328
习题	328
第13章 组合逻辑电路	331
13.1 组合逻辑电路的分析与设计	331
13.2 基本组合逻辑部件	337
本章小结	350
习题	351
第14章 时序逻辑电路	353
14.1 概述	353
14.2 触发器	354
14.3 触发器逻辑功能的转换	363
14.4 寄存器	364
14.5 计数器	368
本章小结	378

习题	378
第 15 章 脉冲的产生和变换电路	382
15.1 555 定时电路	382
15.2 单稳态触发器	384
15.3 多谐振荡器	387
15.4 施密特触发器	390
本章小结	393
习题	394
第 16 章 模 - 数和数 - 模转换器	396
16.1 概述	396
16.2 数 - 模转换器	397
16.3 模 - 数转换器	403
本章小结	406
习题	407
附录 常用电子器件	408
参考文献	411

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的组成与作用

电路就是电流所通过的路径,它由电路元件按功能需要,按照某种特定方式连接而成。如图 1-1(a)所示就是一个简单的直流电路,把电池和灯泡经过开关用导线连接起来。图中电池在电路中为灯泡提供电能,称为电源;灯泡将电能转换为光能、热能等非电能,它是取用电能的设备,称为负载;开关和导线起连接电源和负载的作用,并根据需要控制电路的接通与断开,称为中间环节。

1.1.2 理想电路元件及电路模型

构成电路的常用元器件有电阻器、二极管、电容、电感、变压器、电动机、电池等。这些实际元件的电磁特性往往十分复杂。例如,一个白炽灯通以电流时,除具有消耗电能即

第1章

直流电路

本章知识要求

- ◆ 了解电源、负载及中间环节在电路中的作用；电路三种基本工作状态和电气设备额定值的意义；电路中节点、支路、回路的概念及支路电流法。
- ◆ 理解电流、电压、电位、电动势及电功率的物理概念；电压源与电流源的外特性；基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律的意义；叠加原理、戴维南定理的意义。
- ◆ 掌握电位的计算；电压源与电流源的等效变换；节点电流方程、回路电压方程的列写原则；叠加原理应用于含有两个电源电路的计算；节点电压法应用于含有两个节点的电路计算；戴维南定理用于具有两个独立回路的电路计算。

本章内容是学习本课程各部分的前提，也是学习其他与电工电子技术有关课程的重要基础。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的组成与作用

电路就是电流所通过的路径，它由电路元件根据功能需要，按照某种特定方式连接而成。如图1-1(a)所示就是一个简单的直流电路，把电池和灯泡经过开关用导线连接组成。图中电池在电路中为灯泡提供电能，称为电源；灯泡将电能转换为光能、热能等非电能，它是取用电能的设备，称为负载；开关和导线起连接电源和负载的作用，并根据需要控制电路的接通与断开，称为中间环节。

1.1.2 理想电路元件及电路模型

构成电路的常用元器件有电阻器、二极管、电容、电感、变压器、电动机、电池等。这些实际元器件的电磁特性往往十分复杂。例如，一个白炽灯通以电流时，除具有消耗电能即

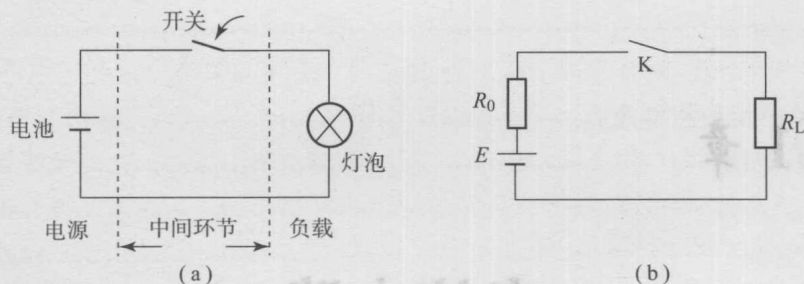


图 1-1 手电筒电路

(a) 手电筒电路; (b) 电路模型

电阻性质外,还会产生磁场,具有电感性质,由于电感很小,可以忽略不计,于是可认为是一电阻元件。因此,为了分析复杂电路的工作特性,就必须进行科学抽象与概括,用一些理想电路元件(或相应组合)来代表实际元器件的主要外部特性。这种模型元件是一种用数学关系描述实际器件的基本物理规律的数学模型,称之为理想元件,简称元件。

这种用理想电路元件来代替实际电路元件构成的电路称为电路模型,简称电路。电路图则是用规定的元件图形反映电路的结构。例如,手电筒电路的模型可由图 1-1 (b) 所示的电路图表示。

理想电路元件在理想电路中是组成电路的基本元件,元件上电压与电流之间的关系又称为元件的伏安特性,它反映了元件的性质。

在实际电路中使用着各种电器、电子元器件,如电阻器、电容、电感器、灯泡、电池、晶体管、变压器等,但是它们在电磁方面却有许多共同的地方。例如,电阻器、灯泡、电炉等,它们的主要电磁性能是消耗电能,这样可用一个具有两个端钮的理想电阻 R 来表示,它能反映消耗电能的特征,其模型符号如图 1-2 (a) 所示。在电路中常用电阻的倒数 ($1/R$) 电导 G 来描述电阻元件,它在国际单位制中的单位为西门子 (S)。

类似地,各种实际电感器主要是储存磁能,用一个理想的二端电感元件来反映储存磁能的特征,理想电感元件的模型符号如图 1-2 (b) 所示。各种实际的电容主要是储存电场能,用一个理想的二端电容来反映储存电场能的特征,理想电容元件的模型符号如图 1-2 (c) 所示。电压源和电流源主要是对外供给不变电压和电流,其模型符号如图 1-2 (d) 和图 1-2 (e) 所示。

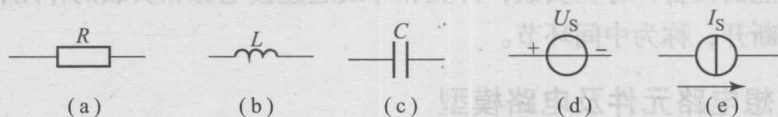


图 1-2 理想电路元件的图形与符号

(a) 电阻; (b) 电感; (c) 电容; (d) 电压源; (e) 电流源

其他的实际电路部件都可类似地将其表示为应用条件下的模型,这里就不一一列举。但关于理想电路元件这里再强调一下:理想电路元件是具有某种确定的电磁性能的理想元件:理想电阻元件只消耗电能(既不储存电能,又不储存磁能);理想电容元件只储存电能(既不消耗电能,又不储存磁能);理想电感元件只储存磁能(既不消耗电能,又不储存电能)。理想电路元件是一种理想的模型并具有精确的数学定义,实际中并不存在。但是不能说所定义的理想电路元件模型理论脱离实际,是无用的。这犹如实际中并不存在“质点”,但“质点”这种理想模型在物理学科运动学原理分析与研究中举足轻重一样,人们所定义的理想电路元件模型在电路理论问题分析与研究中充当着重要角色。

【思考与练习】

1.1.1 分别画出电炉丝、热得快、电动机绕组的理想电路元件符号。

1.1.2 用类似手电筒的电路模型画出家庭照明线路的电路模型图。

1.2 电路主要物理量及电气设备的额定值

1.2.1 电路主要物理量

在电路分析中,常用的物理量有电流(I)、电压(U)、电位(V)、电动势(E)、功率(P)、电能(W)等。

1. 电流及其参考方向

电流是由电荷的定向移动而形成的。众所周知,一段金属导体内含有大量的带负电荷的自由电子,通常情况下,这些自由电子在其内部作无规则的热运动,并不形成电流;若在该段金属导体两端接上电源,那么带负电荷的自由电子就要逆电场方向运动,于是在该段金属导体中便形成电流。在其他场合,如电解溶液中的带电离子作规则定向运动也会形成传导电流。

电流,虽然看不见它,但可通过它的各种效应(如磁效应、热效应)来感知它的客观存在。把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度,简称电流,用 $i(t)$ 表示,即

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

式中, q 为通过导体横截面的电荷量,若电流强度不随时间而变,即 $\frac{dq}{dt}$ 为常数,这种电流是直流电流,常用大写字母 I 表示。

在法定计量单位中电流强度的单位是安培 (A), 简称安。有时也用千安 (kA)、毫安 (mA) 或微安 (μA), $1\text{kA} = 10^3\text{A}$, $1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

电流不仅有大小, 而且还有方向。习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向, 但在电路分析中, 有时某段电流的实际方向难以判断, 有时电流的实际方向还在不断改变。为了解决这一问题, 可任意选定一方向作参考, 称为参考方向 (或正方向), 在电路图中用箭头表示, 也可用字母带双下标表示, 如 I_{ab} 表示参考方向从 a 指向 b, 如图 1-3 所示。并规定: 当电流的参考方向与实际方向一致时, 电流取正值, $I > 0$, 如图 1-3 (a) 所示; 当电流的参考方向与实际方向不一致即相反时, 电流取负值 $I < 0$, 如图 1-3 (b) 所示。这样, 在电路计算时, 只要选定了参考方向, 并算出电流值, 就可根据其值的正负号来判断其实际方向了。

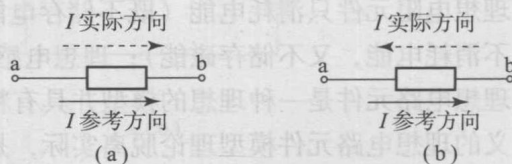


图 1-3 电流参考方向与实际方向的关系
(a) $I > 0$; (b) $I < 0$

2. 电压及其参考方向

为衡量电路元件吸收或发出电能的情况, 在电路分析中引入了电压这一物理量。从电场力做功概念来定义, 电压就是将单位正电荷从电路中一点移至另一点电场力做功的大小。其数学表达式为

$$U_{ab} = \frac{dw}{dq} = V_a - V_b \quad (1-2)$$

式中, V_a 、 V_b 为 a、b 点的电位; U_{ab} 为 a、b 点间的电位之差。电压总是与电路中两点相联系的。

在法定计量单位中, 电压的单位是伏特 (V), 简称伏。有时也用千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 作单位, $1\text{kV} = 10^3\text{V}$, $1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$ 。

电路中电压的实际方向规定为从高电位指向低电位。但在复杂的电路里, 电压的实际方向是不易判别的, 在交流电路里, 两点间电压的实际方向是分时间段交替改变的, 这给实际电路问题的分析计算带来不便, 所以需要假设其方向。在电路图中, 常标以 “+” “-” 号表示电压的正、负极性或参考方向。在图 1-4 (a) 中, a 点标以 “+”, 极性为正, 称为高电压; b 点标以 “-”, 极性为负, 称为低电压。一旦选定了电压参考方

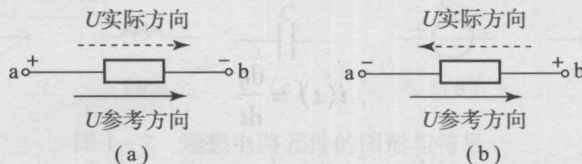


图 1-4 电压参考方向与实际方向的关系
(a) $U > 0$; (b) $U < 0$

向后, 若 $U > 0$, 则表示电压的真实方向与选定的参考方向一致; 反之则相反, 如图 1-4 (b) 所示。也有的用带有双下标的字母表示, 如电压 U_{ab} , 表示该电压的参考方向为从 a 点指向 b 点。这种选定也具有任意性, 并不能确定真实的物理过程。

电路中电流的正方向和电压的正方向在选定时都有任意性, 二者彼此独立。但是, 为了分析电路方便, 常把元件上的电流与电压的正方向取为一致, 称为关联参考方向, 如图 1-5 (a) 所示; 不一致时称为非关联参考方向, 如图 1-5 (b) 所示。人们约定, 除电源元件外, 所有元件上的电流和电压都采用关联参考方向。

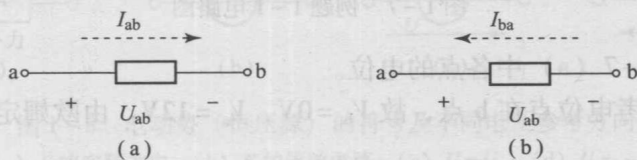


图 1-5 电压和电流的关联、非关联参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

3. 电位

物理学中规定, 将单位正电荷从某一点 a 沿任意路径移动到参考点, 电场力做功的大小称为 a 点的电位, 记为 V_a 。所以为了求出各点的电位, 必须选定电路中的某一点作为参考点, 并规定参考点的电位为零, 则电路中的任一点与参考点之间的电压 (即电位差) 就是该点的电位, 如 $U_{ad} = V_a - V_d$ 。

电力系统中, 常选大地为参考点; 在电子线路中, 则常选机壳电路的公共线为参考点。线路图中都用符号 “ $\perp$ ” 表示, 简称 “接地”。图 1-6 (a) 所示电路, 是利用电位的概念, 简化成图 1-6 (b) 所示。在电子线路中, 常使用这种简化画法。

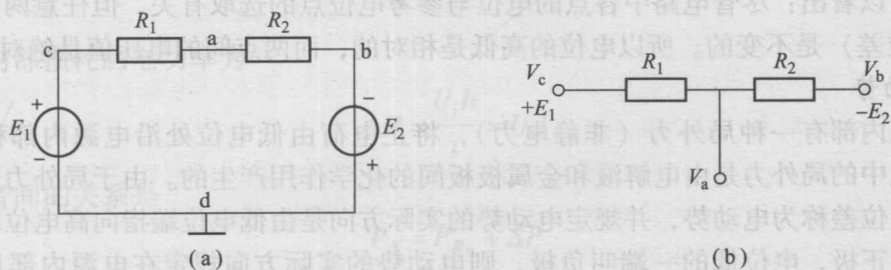


图 1-6 双电源电路及简化画法

(a) 双电源电路; (b) 简化画法

【例 1-1】 电路如图 1-7 所示, 已知: $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $R_3 = 30\Omega$, 试求图 1-7 中 a、b、c、d 各点的电位 V_a 、 V_b 、 V_c 、 V_d 。

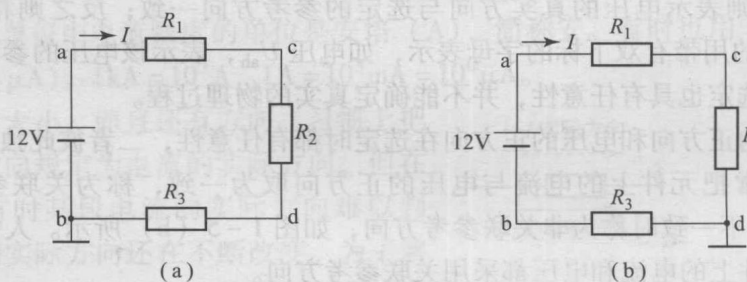


图 1-7 例题 1-1 电路图

解: (1) 求图 1-7 (a) 中各点的电位。

图中已给定的参考电位点在 b 点, 故 $V_b = 0V$, $V_a = 12V$ 。由欧姆定律知电路中电流 I 的大小为

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{12}{10 + 20 + 30} = 0.2 \text{ (A)}$$

则 $U_{ac} = IR_1 = 0.2 \times 10 = 2 \text{ (V)}$, $U_{ad} = I(R_1 + R_2) = 0.2 \times (10 + 20) = 6 \text{ (V)}$,

$$U_{ac} = V_a - V_c, U_{ad} = V_a - V_d$$

$$V_c = V_a - U_{ac} = 10 \text{ (V)}, V_d = V_a - U_{ad} = 6 \text{ (V)}$$

(2) 求图 1-7 (b) 中各点的电位。

图中已给定的参考电位原点在 d 点, 故 $V_d = 0V$, 电路中电流 I 的大小与图 1-7 (a) 相同。

则 $U_{ad} = I(R_1 + R_2) = 0.2 \times (10 + 20) = 6 \text{ (V)}$, $U_{cd} = IR_2 = 0.2 \times 20 = 4 \text{ (V)}$,

$U_{bd} = -IR_3 = -0.2 \times 30 = -6 \text{ (V)}$, 所以

$$V_a = 6V, V_b = -6V, V_c = 4V。$$

由此可以看出: 尽管电路中各点的电位与参考电位点的选取有关, 但任意两点间的电压值 (即电位差) 是不变的。所以电位的高低是相对的, 而两点间的电压值是绝对的。

4. 电动势

在电源内部有一种局外力 (非静电力), 将正电荷由低电位处沿电源内部移向高电位处, 如电池中的局外力是由电解液和金属极板间的化学作用产生的。由于局外力而使电源两端具有的电位差称为电动势, 并规定电动势的实际方向是由低电位端指向高电位端。把电位高的一端叫正极, 电位低的一端叫负极, 则电动势的实际方向规定在电源内部从负极到正极, 如图 1-8 (a) 所示。因此, 在电动势的方向上电位是逐点升高的。电动势在数值上等于局外力把正电荷从负极板搬运到正极板所做的功 W_{ab} 与被搬运的电荷量 Q 的比值, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-3)$$

电动势的单位也用伏特 V 表示。

由于电动势 E 两端的电压值为恒定值，且不论电流的大小和方向如何，其电位差总是不变，故用一恒压源 U_S 的电路模型代替电动势 E ，如图 1-8 (b) 所示。在分析电路时，电路中电压参考方向不同时，其数值也不同。当选取的电压参考方向与恒压源的极性一致时， $U = U_S$ ，如图 1-8 (c) 所示；相反时， $U = -U_S$ ，如图 1-8 (d) 所示。且与电路中的电流无关。

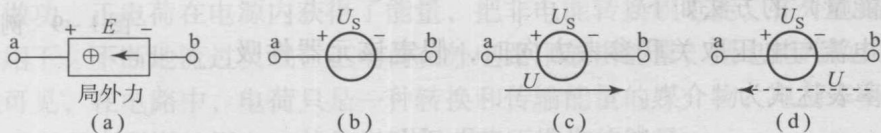


图 1-8 电动势（恒压源）的符号及不同电压参考方向

(a) E 的实际方向；(b) E 的等效电路；(c) $U = U_S$ ；(d) $U = -U_S$

5. 电功率

电路中单位时间内消耗的电能称为电功率，电功率的大小等于电流与电压的乘积，即 $P = UI$ 。

在法定计量单位中功率的单位是瓦 (W)，也常用千瓦 (kW)、毫瓦 (mW)。
 $1\text{W} = 10^3\text{mW}$ 。

如图 1-9 所示，在闭合电路中恒压源产生的电功率为

$$P_E = \frac{EIt}{t} = EI \quad (1-4)$$

负载取用的电功率为

$$P_{R_L} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-5)$$

电源内部损耗的电功率为

$$\Delta P = \frac{U_i It}{t} = U_i I \quad (1-6)$$

这三者间的关系是

$$P_E = P_{R_L} + \Delta P \quad (1-7)$$

式 (1-7) 称为电路的功率平衡方程式。

【例 1-2】如图 1-9 所示，已知恒压源 $E = 24\text{V}$ ，电源输出电压 $U = 22\text{V}$ ，电流 $I = 5\text{A}$ ，求 P_E 、 P_{R_L} 、 ΔP 和 U_i 的大小并说明功率平衡关系。

解： $P_E = EI = 24 \times 5 = 120 (\text{W})$

$P_{R_L} = UI = 22 \times 5 = 110 (\text{W})$