

教育部规划教材

中等职业学校机电一体化专业
(含岗位培训行业中级技术工人等级考核)

电工技术

全国中等职业学校机电一体化专业教材编写组 编
曹建林 许传清 主编

高等教育出版社

教育部规划教材

中等职业学校机电一体化专业

(含岗位培训行业中级技术工人等级考核)

电 工 技 术

全国中等职业学校机电一体化专业教材编写组 编

曹建林 许传清 主编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是教育部组织编写的全国中等职业学校机电一体化专业教材,为教育部规划教材。

本书内容包括:电路的基本概念和基本定律、直流电路、正弦交流电路、三相正弦交流电路、非正弦周期电路、线性动态电路、磁场和磁路、电磁铁和变压器、交流电动机、直流电动机、控制电机、常用低压电器、电气控制线路的基本环节和机床控制线路等共十四章。

本书取材力求科学、先进。结合当代科学技术发展状况,注重内容的实用性和针对性。讲述过程中注意内容的组织,尝试“问题教学法”,从问题的提出到结论,符合学生的认知规律。

本书参照劳动部颁发的中级技术工人等级标准及职业技能鉴定规范,结合中等专业学校、职业学校特点编写,可以作为中等专业学校、职业学校机电一体化专业及机械类专业教材,也可作为机械行业的技术人员岗位培训教材及自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/曹建林、许传清主编. —北京:高等教育出版社,2000.7

ISBN 7-04-008176-8

I. 电… II. ①曹…②许… III. 电工技术
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 23094 号

电工技术

全国中等职业学校机电一体化专业教材编写组 编

2168/37

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

电 话 010-64054588

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100009

传 真 010-64014048

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 26.75

字 数 650 000

版 次 2000 年 7 月第 1 版

印 次 2000 年 7 月第 1 次印刷

定 价 33.20 元

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

前 言

本书是根据江苏省教育委员会 1997 年制定的中等专业学校和职业学校机电一体化专业教学计划及“电工技术”课程教学大纲编写的,同时作为中等职业学校机电一体化专业教育部规划教材。

本课程是机电一体化专业的一门重要技术基础课。其任务是使学生掌握机电一体化专业必备的电工基础知识、电动机与电气控制的基本知识;并了解一些常用的电工应用技术、电动机及控制技术等。本书主要有电工基础、电动机与电气控制两大部分组成。电工基础部分主要由电路基本概念和基本定律、直流电路、正弦交流电路、三相正弦交流电路、非正弦周期电路、线性动态电路、磁场和磁路、电磁铁和变压器等组成;电动机与电气控制部分主要介绍交流电动机、直流电动机、控制电机、常用低压电器、电气控制的基本环节、常用机床电气控制线路等。由于该课程是机电一体化专业基础性综合化课程,考虑到中等职业学校学生的特点,电工基础部分做到内容浅显好学,语言通俗易懂,体现科学性、逻辑性;电动机与电气控制部分做到内容简洁实用,语言精炼流畅,体现针对性、应用性。同时本书还配有按课程教学大纲要求的技能训练 8 个,使理论教学与技能训练紧密结合,旨在培养学生理论联系实际的能力。

本教材参考教学时数为 180 学时,其中理论教学 164 学时,技能训练 16 学时。具体学时分配参见下表:

章 次	学 时	章 次	学 时
一	14	九	16
二	10	十	8
三	20	十一	6
四	10	十二	8
五	4	十三	22
六	10	十四	18
七	8	技能训练	16
八	10	合计	180

本书由无锡无线电工业学校曹建林、南京工业职业技术学院许传清担任主编。其中许传清编写了第一章、第二章、第三章;苏州市机械学校殷庆纵编写了第四章、第五章、第六章;锡山市工业学校顾建达编写了第七章、第八章;曹建林编写了第九章、第十章、第十一章;常州

刘国钧职教中心吴文龙编写了第十二章、第十三章、第十四章。全书由南京工业职业技术学院朱家建副院长审阅。本书还得到江苏省教委职教办睦平同志的支持和指导。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诚挚的感谢。

由于时间仓促及编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者不吝指教。

编 者

1999 年 12 月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1	本章小结	139
第一节 电路和电路中的主要物理量	1	习题与思考题	140
第二节 电路的工作状态与电气设备的额定值	7	第四章 三相正弦交流电路	146
第三节 电阻元件	10	第一节 三相正弦交流电路概述	146
第四节 电容元件	16	第二节 三相电源的连接	148
第五节 电感元件	22	第三节 三相负载的连接	151
第六节 基尔霍夫定律	25	第四节 对称三相电路的分析与计算	153
第七节 电压源和电流源	29	第五节 不对称三相电路的概念	155
第八节 电路中各点电位的计算	34	第六节 三相电路的功率	160
技能训练(一) 直流电流、直流电压和电位的测量	36	第七节 保护接地与保护接零	163
本章小结	43	技能训练(四) 三相照明电路	165
习题与思考题	46	本章小结	168
第二章 直流电路	51	习题与思考题	168
第一节 电阻的连接及其等效变换	51	第五章 非正弦周期电路	172
第二节 两种电源模型的等效变换	60	第一节 非正弦周期量及其分解	172
第三节 支路电流法	64	第二节 非正弦周期量的有效值与平均功率	175
第四节 叠加定理	66	第三节 非正弦周期电路的分析	177
第五节 戴维宁定理	68	本章小结	180
技能训练(二) 电阻的测量	73	习题与思考题	180
本章小结	79	第六章 线性动态电路	181
习题与思考题	81	第一节 过渡过程概述	181
第三章 正弦交流电路	86	第二节 换路定律及电路初始值的计算	182
第一节 正弦交流电及正弦量的三要素	86	第三节 RC 电路的动态响应	184
第二节 复数及其运算	91	第四节 RL 电路的动态响应	190
第三节 正弦量的相量表示法	96	第五节 一阶电路的三要素法	193
第四节 正弦交流电路中的电阻、电容和电感	98	本章小结	194
第五节 RLC 串联电路	107	习题与思考题	195
第六节 阻抗的串并联电路	112	第七章 磁场和磁路	199
第七节 正弦交流电路的功率	116	第一节 磁现象与磁场	199
第八节 电路的谐振	122	第二节 磁场的基本物理量	201
第九节 有耦合电感的正弦交流电路	127	第三节 铁磁性材料的性质	205
技能训练(三) 日光灯电路及其功率因数的提高	132	第四节 铁磁性材料的分类与用途	210
		第五节 磁路及磁路定律	213
		本章小结	217
		习题与思考题	219

第八章 电磁铁和变压器	221	第二节 测速发电机	317
第一节 交流铁心线圈	221	第三节 步进电动机	320
第二节 电磁铁	227	本章小结	322
第三节 单相变压器	229	习题与思考题	323
第四节 三相变压器	233	第十二章 常用低压电器	324
第五节 变压器的结构与分类	236	第一节 开关类控制电器	324
第六节 几种特殊用途的变压器	241	第二节 熔断器	330
第七节 变压器的铭牌数据	245	第三节 交流接触器	332
本章小结	248	第四节 继电器	334
习题与思考题	250	本章小结	343
第九章 交流电动机	252	习题与思考题	344
第一节 三相异步电动机的结构与 工作原理	252	第十三章 电气控制的基本环节	345
第二节 三相异步电动机的电磁转矩与 机械特性	258	第一节 三相笼型异步电动机单向直接 起动控制线路	345
第三节 三相异步电动机的起动、调速、 反转与制动	263	第二节 三相笼型异步电动机正反转 控制线路	348
第四节 三相异步电动机的铭牌 数据与选用	270	第三节 行程控制线路	352
第五节 单相异步电动机	277	第四节 多地控制与顺序控制线路	355
第六节 三相同步电动机	280	第五节 三相笼型异步电动机降压起动 控制线路	359
技能训练(五) 三相笼型异步电动机的拆卸、 清洗与组装	282	第六节 三相笼型异步电动机制动 控制线路	363
技能训练(六) 三相异步电动机的试验	285	第七节 三相笼型异步电动机调速 控制线路	369
本章小结	288	技能训练(八) 三相笼型异步电动机正反转 电气控制线路的安装	372
习题与思考题	291	本章小结	374
第十章 直流电动机	293	习题与思考题	376
第一节 直流电动机的结构与工作原理	293	第十四章 常用机床电气控制线路	383
第二节 并励(他励)电动机的机械特性	299	第一节 CA6140 车床电气控制线路	383
第三节 直流电动机的起动、调速、 反转与制动	300	第二节 M7120 平面磨床电气控制线路	387
第四节 直流电动机的铭牌数据与使用	305	第三节 Z3040 摇臂钻床电气控制线路	391
技能训练(七) 直流并励电动机的起动、 反转和调速	307	第四节 X62W 万能铣床电气控制线路	395
本章小结	309	第五节 T68 镗床电气控制线路	402
习题与思考题	310	本章小结	408
第十一章 控制电机	312	习题与思考题	409
第一节 伺服电动机	312	部分习题参考答案	411
		参考文献	418

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章介绍电路的基本概念、基本物理量、基本元件和基本定律。有些内容在中学物理课中学习过，本章将从工程的角度对它们作进一步的分析研究。

第一节 电路和电路中的主要物理量

本节介绍电路、电路模型的基本概念以及电路中的主要物理量。

一、电路的组成

在日常的生产生活中广泛应用着各种各样的电路，例如照明电路、通信电路、仪表电路、机床电路、电子电路等。这些电路的形式和功能各不相同，但一般都包括电源、负载、连接导线和控制装置等四个部分。电源(如干电池、发电机等)将其他形式的能转化为电能，是电路中能量的提供者；负载(如电灯、电炉、电动机等)将电能转化为其他形式的能，是电路中能量的消耗者；连接导线的作用则是输送电能；控制装置的作用很多，例如接通和断开电路、保护电路不被损坏等，开关和保险丝就是比较简单的控制装置。

手电筒电路是一个最简单的电路，它也由以上四个部分组成。干电池、灯泡、金属外壳和开关分别是它的电源、负载、连接导体和控制装置。图 1-1(a)所示为手电筒电路的示意图。



图 1-1 手电筒电路

二、电路模型

像图 1-1(a)这样的图形在分析器件的接法和原理时是很有用的，但要用它对电路进行定量分析和计算则非常困难。此外，要将所有的实际部件一一画出也不现实。所以通常用一些简单但却能够表征电路主要电磁性能的理想元件来代替实际部件。这样，任何实际电路都可以表示为理想元件的组合。

以下以手电筒电路为例说明理想元件的概念。

众所周知，白炽灯泡是利用电流的热效应制成的。因受热的灯丝发光，所以灯泡可用来照明。但是当电流通过时，灯丝不仅呈现电流的热效应，还呈现电流的磁效应。不过，这种磁效应是极其微弱的，完全可以忽略不计。因此，可以把它看作是一个理想电阻器，在电路图中用一个电阻代替。

干电池是电源，但在输出电能的同时也要发热，这说明它内部也有电阻在消耗能量，通常把这种电源自身所固有的电阻称为内阻。由于干电池的内阻和灯泡的电阻相比非常小，它消耗的能量可以忽略不计。这样，就可以把干电池看作是一个没有内阻的理想电源。

手电筒的金属外壳在电流通过时同样会发热，呈现电阻的特性。但因其耗电量小，可以忽略不计。所以，手电筒的金属外壳也可以被看作是一个理想导体，在电路图中，用一条线段表示。

这样，实际的手电筒电路可以画成图 1-1(b)所示形式。这种由理想元件构成的电路称为电路模型。本书所研究的电路都是指电路模型。

必须指出，电路模型只是实际电路的近似，不能把二者等同。这是因为电路模型只是反映了电路的主要性能，而忽略了它的次要性能。

建立电路模型的意义是十分重要的。实际电气设备和器件的种类繁多，但理想电路元件只有有限的几种，因此建立电路模型可以使电路的分析大大简化。

一般的理想元件有两个与外部电路相连接的端钮，称为二端元件。也有的理想元件有三个或四个与外部电路相连接的端钮，分别称之为三端元件和四端元件。晶体三极管就是一个三端元件，而理想变压器则是一个四端元件。

各种电气元件都可以用图形符号表示，国家标准局于 1985 年颁布的《电气图用图形符号》(代号为 GB 4728.1—85)对此作了具体规定。

图 1-2(b)、(c)和(d)分别为二端元件电阻、三端元件晶体管和四端元件理想变压器的图形符号。没有说明具体性质的二端元件，通常用方框符号表示，它可以代表任意一个元件，如图 1-2(a)所示。

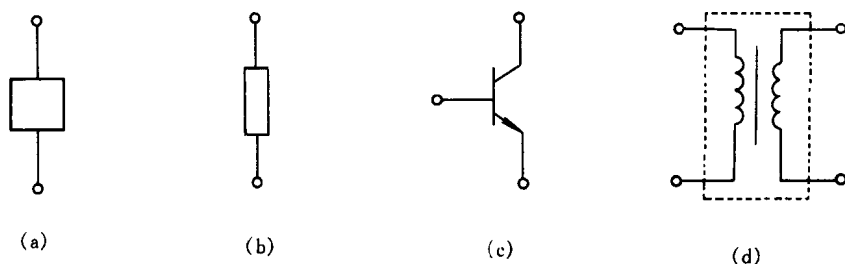


图 1-2 理想元件

三、电路中的主要物理量

1. 电流

电荷在电路中有规则的运动形成电流。在不同的导电材料中，可以自由运动的电荷不同。在金属导体中，能够自由运动的是电子，它们在电场力的作用下，逆着电场方向运动，形成电

流；在电离了的气体或电解液中，正离子和负离子分别向着两个相反的方向运动，也都可以形成电流。

既然正、负两种电荷的运动都能形成电流，那么如何确定电流的方向呢？习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。图 1-3 所示为导体 ab，其中负电荷由 b 通过截面 S 向 a 移动，电流的方向则规定为由 a 到 b。

对于图 1-3 所示的简单电路，可以很方便地判断出电流的实际方向，但对于较为复杂的电路，电流的实际方向则很难确定。同时另有一些电路，如第三章将要讲到的正弦交流电路，电流的实际方向是不断变化的。为此，引入电流的参考方向的概念。所谓电流的参考方向，是一种假定的方向，可以任意指定。对电路进行分析计算时，即以此假定的方向为依据。参考方向不一定就是电流的实际方向，实际方向必须根据计算的结果判断：若计算结果为正，说明参考方向和实际方向一致；若计算结果为负，则说明参考方向和实际方向相反。在电路图中，参考方向用实线箭头表示。

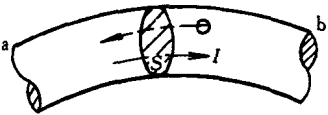


图 1-3 电流的实际方向

在对电路进行分析计算时，必须在电路图中标明电流的参考方向，否则讨论电流的正负毫无意义。今后除非特别说明，电路图中标出的电流方向都是指参考方向。

电流不但有方向，而且有大小。实验证明，单位时间内通过导体截面的电荷越多，电流越大；电荷越少，则电流越小。由此，电流的大小可定义为单位时间内通过导体横截面的总电荷量，记作

$$I = \frac{q}{t} \tag{1-1}$$

在国际单位制(称作 SI 制)中，电流的基本单位是安[培]，符号为 A。如果在 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷为 1 库[仑](C)，导体中的电流就是 1 安(A)。

如果需要使用较大或较小的单位，在基本单位前加上词头即可。如千安(kA, 1 kA = 10³ A)，毫安(mA, 1 mA = 10⁻³ A)。表 1-1 所示为部分常用的 SI 词头。

表 1-1 几种常用的 SI 词头

因数	词 头	符 号		因数	词 头	符 号	
		中文	原文			中文	原文
10 ⁶	兆 mega	兆	M	10 ⁻²	厘 centi	厘	c
10 ³	千 kilo	千	k	10 ⁻³	毫 milli	毫	m
10 ²	百 hecto	百	h	10 ⁻⁶	微 micro	微	μ
10 ¹	十 deca	十	da	10 ⁻¹²	皮 pico	皮	p

这里需要指出的是，电路有直流电路和交流电路之分。在直流电路中，电流的大小和方向是恒定的，不随时间的变化而变化，叫做恒定电流，简称直流(简写作 dc 或 DC)。直流电流用大写英文字母 I 表示。在交流电路中，电流的大小和方向都随时间变化，称为交变电流，简称交流(简写作 ac 或 AC)。交流电流用小写英文字母 i 表示。本章只讨论直流电路，以下所介绍的物理量如果不另作说明都是指直流。

例 1-1 二端元件中电流的参考方向如图1-4所示。已知 $I_1 = 10\text{ A}$, $I_2 = -10\text{ A}$, 请说明电流的实际方向。

解 (a) 电流的参考方向由 a 到 b, 而且 $I_1 = 10\text{ A} > 0$, 说明电流的实际方向和参考方向相同, 也从 a 流到 b。

(b) 电流的参考方向由 a 到 b, 而且 $I_2 = -10\text{ A} < 0$, 说明电流的实际方向与参考方向相反, 应由 b 流到 a。

2. 电压

在导体中, 只有当电荷进行有规则的运动时, 才会形成电流。而在通常情况下, 导体中电荷的运动是杂乱无章的, 从宏观上看, 没有电荷的定向移动, 因而不能形成电流。要使导体中有电流通过, 导体两端必须有电压的作用。正像水管中自来水的定向流动必须有重力或压力的作用一样。

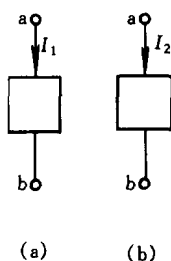


图 1-4

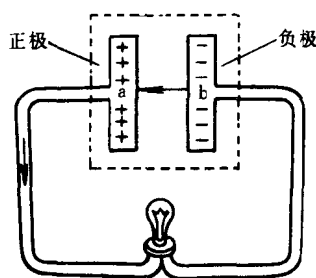


图 1-5 实验电路

以下用图 1-5 所示的实验电路来说明电压的含义。

图中, a、b 是两个带有等量异号电荷的导体。其中 a 带正电, b 带负电。用导线将导体 a、b 通过灯泡连接起来, 灯泡会发光, 这说明灯丝中有电流通过。那么电流是如何形成的呢? 我们知道, 导体中的负电荷在电场力作用下由 b 移动到 a, 才形成了由 a 到 b 的电流。也就是说, 电场力作功产生了电流。为了衡量电场力作功的能力, 引入电压这个物理量。电压的定义是: 单位正电荷从 a 点移动到 b 点电场力所作的功, 记为

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 电压的单位是伏[特], 符号为 V。

式(1-2)表示, 将 1 库电荷从 a 点移动到 b 点, 电场力所作的功为 1 焦[耳](J)时, a、b 两点之间的电压为 1 伏(V)。

电压总是对电路中的两点而言, 因而用双下标表示, 其中前一个下标代表正电荷运动的起点, 后一个下标代表正电荷运动的终点, 电压的方向则由起点指向终点。在电路图中, 电压的方向用“+”和“-”两个符号表示, 分别代表正电荷运动的起点和终点, 读作“正极”和“负极”, 如图 1-5 所示。因此, 也把电压的方向称做电压的极性。

和电流一样, 电路中任意两点之间的电压的实际方向往往也不能预先确知, 需要规定参考方向。电压的参考方向也是可以任意指定的。同样, 电压的参考方向不一定就是它的实际方向。实际方向要根据计算结果判断: 若计算结果为正, 说明参考方向和实际方向一致; 若计算

结果为负，则说明参考方向和实际方向相反。

对电路进行分析计算时，必须在电路图中标出电压的参考极性，否则谈论电压的正负毫无意义。今后除非特别说明，电路图中所标电压的极性都是指参考极性。

例 1-2 图1-6所示二端元件上所标的电压为参考极性。若 $U_1 = 1\text{ V}$ ， $U_2 = -1\text{ V}$ ，试指出电压的实际极性。

解 (a) 图中，因 $U > 0$ ，说明电压的参考方向和实际方向一致。电压的实际方向为从 a 到 b。

(b) 图中，因 $U < 0$ ，说明电压的参考方向和实际方向相反。电压的实际方向为从 b 到 a。

综上所述，在分析电路时，既要选择电流的参考方向，又要选择电压的参考方向。这两种参考方向原则上都可以任意假定，但是为了计算方便，对于负载(也叫外电路)，习惯上把电压和电流的参考方向选为一致，称为关联参考方向，如图 1-7(a)所示；而对电源，则把电压和电流的参考方向选为不一致，称为非关联参考方向，如图 1-7(b)所示。

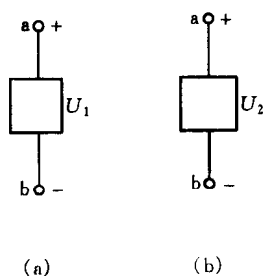


图 1-6

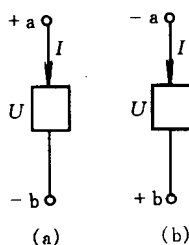


图 1-7 关联与非关联参考方向

3. 电动势

在图 1-5 所示的实验电路中，随着极板 a 上的正电荷不断向极板 b 移动，极板 a 上的正电荷和极板 b 上的负电荷都会越来越少(负电荷减少的原因是由于正、负电荷发生中和)。相应地，电路中通过的电流也会越来越小。显然，这样的电路没有实际意义。如果能使极板 a 上的正电荷在 a、b 之间循环运动，就能维持 a、b 间的电压，从而得到持续不断的电流。但是，要让移动到负极板上的正电荷逆着电场力的方向返回正极板，必须要有外力做功。电源就具有这种能力，我们把它叫做电源力。干电池中的化学力，发电机中的电磁力等也具有这种能力。

电源的作用和水泵很相似。水泵不断地把低处的水抽到高处，使供水系统始终保持一定的水压；电源则不断地把负极板上的正电荷移到正极板，使两极板间始终保持一定的电压。这样，电路中才会有持续不断的电流。

为了衡量电源力做功的能力，引入电动势的概念。其定义如下：在电源内部，电源力将单位正电荷从负极板移动到正极板所作的功叫做电源的电动势，记为

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

在国际单位制中，电动势的单位也是伏[特](V)。

电动势只存在于电源内部，其方向与电压的方向相反，即由负极指向正极。在它的作用下，电源内部形成由负极到正极的电流，如图 1-5 所示。

由以上分析可知,就产生电流的作用来说,电动势和电压是没有什么区别的,但是在电路分析中用得较多的是电压的概念。

4. 电位

在电工技术中,通常使用电压的概念,例如:日光灯的电压是 220 V,电动机的电压是 380 V。而在电子线路中,则经常要用到电位的概念。

在电路中任选一个参考点,某一点到参考点的电压就叫做该点的电位。电位用 V 表示,例如电路中某点 a 的电位记作 V_a 。电位的单位也是伏[特](V)。

由电位的定义可知,电位实际上就是电压。不过电压是指任意两点之间,而电位则是指某一点和参考点之间,二者不同。

参考点是计算电位的基准,电路中各点电位都是针对这个基准而言的。通常选择大地为参考点,如同计算山脉的高度以海平面为“参考点”一样。

通常规定参考点的电位为零,因此,参考点又叫零电位点。

引入电位的概念后,电路中任意两点之间的电压即为该两点之间的电位差。例如 a 、 b 之间电压可记为

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

根据 V_a 和 V_b 的大小,式(1-4)可以有以下三种不同情况:

(1) $V_a > V_b$ 表示 a 点电位高于 b 点电位。

(2) $V_a < V_b$ 表示 a 点电位低于 b 点电位。

(3) $V_a = V_b$ 表示 a 、 b 两点等电位。

引入电位的概念后,电压的方向可以看作电位降低的方向,电动势的方向则为电位升高的方向。

5. 电功率

在图 1-5 所示的实验电路中,正电荷通过负载由高电位移动到低电位,形成了由 a 到 b 的电流。在这个过程中,电场力作功,把电能转化为热能。在电源内部,正电荷从低电位移动到高电位,形成了由 b 到 a 的电流,在这个过程中,电源力作功,把其他形式的能转换为电能。

实验证明,不同的电路在相等的时间内转换的能量的多少是不同的。通常用电功率衡量电路转换能量的速度。电功率简称功率,等于单位时间内所作的功,用 P 表示,记为

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-5)$$

将式(1-1)和式(1-2)代入上式得

$$P = UI \quad (1-6)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦[特],符号为 W 。

式(1-6)为功率的一般表达式。如果已知某段电路的电压和电流,就可以求出这段电路的功率,但是要判断该电路中的元件是消耗功率还是产生功率,必须根据电流和电压的参考方向是否关联进行讨论。为此,我们规定:

(1) 采用关联参考方向时, $P = UI$ 表示元件消耗功率。若 $P > 0$, 表示元件的确是消耗功率,为耗能元件。若 $P < 0$, 则表示元件实际上是产生功率,为电源。

(2) 采用非关联参考方向时, $P = UI$ 表示元件产生功率。若 $P > 0$, 表示元件的确是产生功率, 为电源。若 $P < 0$, 则表示元件实际上是消耗功率, 为耗能元件。

例 1-3 在图 1-8 所示电路中, 各电流、电压均为参考方向, 试计算各元件的功率, 并说明它们是耗能元件还是电源。

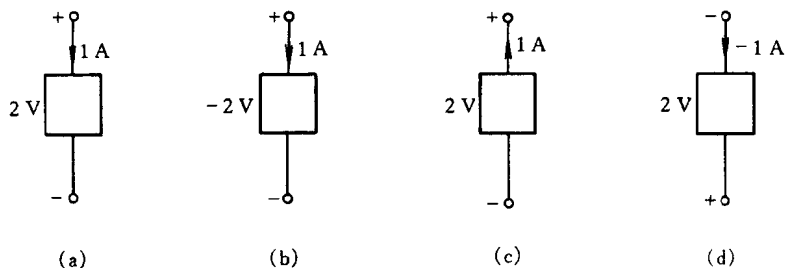


图 1-8

解 (a) 图中, 元件的电流和电压为关联参考方向, 所消耗的功率为

$$P = UI = 2 \times 1 \text{ W} = 2 \text{ W} > 0$$

元件为耗能元件。

(b) 图中, 元件的电流和电压为关联参考方向, 所消耗的功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 \text{ W} = -2 \text{ W} < 0$$

元件实际上为电源。

(c) 图中, 元件的电流和电压为非关联参考方向, 所产生的功率为

$$P = UI = 2 \times 1 \text{ W} = 2 \text{ W} > 0$$

元件为电源。

(d) 图中, 元件的电流和电压为非关联参考方向, 所产生的功率为

$$P = UI = 2 \times (-1) \text{ W} = -2 \text{ W} < 0$$

元件实际上为耗能元件。

6. 电能

在电力工程中, 常常需要计算和测量电能。电能的符号为 W 。当已知设备的功率为 P 时, 则时间 t 内消耗的电能

$$W = Pt \quad (1-7)$$

在国际单位制中, 电能的单位是焦[耳], 符号为 J。在实际应用中, 则用千瓦[小]时(kW·h)作单位。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

第二节 电路的工作状态与电气设备的额定值

电路的工作状态有开路、短路和有载工作三种情况。

一、开路

电源和负载未被接通的工作状态叫开路, 又叫断路。图 1-9 所示电路即为开路状态。

图中 E 为电源的电动势, R_0 为电源的内阻, R 为负载电阻, U 为电源的端电压。

开路时, 电路具有以下特征:

- (1) 电路中的电流为零, 这种情况常称为电源开路或空载;
- (2) 电源开路时的端电压又叫开路电压, 开路电压在数值上等于电源的电动势, 即

$$U = U_{OC} = E \quad (1-8)$$

电路的任意处都可能发生开路。

大多数情况下, 电路的开路是允许的。但是也有些电路则不允许开路, 例如用来测量大电流的电流互感器, 它的副边线圈绝对不允许开路, 否则会产生过高电压, 危及人身和设备的安全。

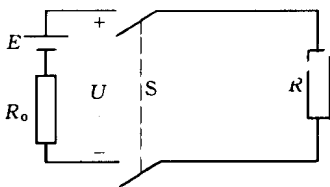


图 1-9 电源开路状态

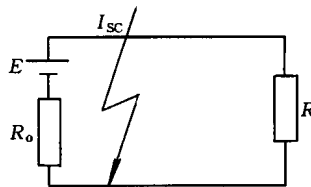


图 1-10 电源短路状态

二、短路

在正常情况下, 电路中的电流是从电源的一端经由负载回到电源的另一端。如果由于某种原因将电源的两个极性端直接相连, 电源就被短路了。在图1-10所示电路中, 电源的两端被折线短路。

电源被短路时, 电路具有以下特征:

- (1) 电流不经过负载, 直接通过短路线和电源自身的电阻, 因此数值一般都很大, 称为短路电流。短路电流用 I_{sc} 表示, 其值为

$$I_{sc} = \frac{U}{R_0} \quad (1-9)$$

- (2) 电源和负载的端电压均为零。

- (3) 电源对负载没有功率输出, 它所产生的功率全部消耗在内阻上。

电源被短路会造成严重后果, 例如导致电源因发热过甚而损坏, 或因电流过大引起电气设备的机械损伤。

电源短路往往是由于设备的绝缘损坏或操作错误引起的。在实际工作中, 应当尽量避免电源短路。为此, 通常在电路中接入一种叫做熔断器的保护装置, 如图1-11所示。熔断器中装有熔丝, 它是用低熔点的铅锡合金丝或铅锡合金片制作的。熔丝是串联接入电路的, 一旦电路发生短路, 由于短路电流很大, 熔丝因发热过大而立即熔断。这样就迅速切除短路部分, 从而保护了电源和其他电气设备。

不仅电源会发生短路, 负载两端或电路的某些部分也会发生短路。电源的短路要极力避免, 而负载或电路某些部分的短路并不都是故障现象, 有时为了实际需要, 甚至可能人为地将电路的某一部分短路。为了和电源短路相区别, 把这种情况叫做短接。

例如，在电工测量中，有时为了防止电流表过载，在接通电源前，通常先在电流表的两个接线柱上并联一个开关。将开关闭合，使电路中的电流直接通过开关，而不通过电流表。待电路稳定运行后，再打开开关，读取电流表的数据。如图 1-12 所示。

还有一些电气设备，在工作时就接成短路或接近短路的状态。例如电焊变压器的副边电路。

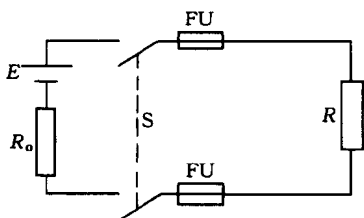


图 1-11 熔断器的安装

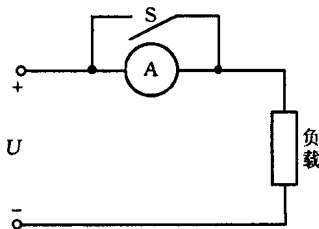


图 1-12 用开关将电流表短接

三、有载状态

当电源与负载接成闭合通路时，电源处于有载工作状态。将图 1-9 所示电路中的开关 S 闭合，即为有载状态。

根据物理课中学过的知识，可以求得电路中的电流、电压和功率。其中电路中的电流为

$$I = \frac{U}{R_0 + R} \quad (1-10)$$

负载电阻的电压和功率分别为

$$\left. \begin{aligned} U &= RI \\ P &= RI^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

电源输出的功率为

$$P_S = EI \quad (1-12)$$

由以上各式可见，增大电路中的电流或电压，可以提高电源的输出功率。但是实际上，各种电气设备所允许通过的电流和所允许承受的电压都有一定的限额，若超过这个限额，就会损害电气设备，或影响它的使用寿命。若电流过大，电源可能因发热严重而损坏；若电压过高，电气设备的绝缘可能被击穿。在实际应用中，通常把这个限额叫做电气设备的额定值。

额定值主要指额定电压、额定电流和额定功率。额定电压是指电气设备在长期运行中所允许承受的最高电压，用 U_N 表示；额定电流是指电气设备在长期运行中允许通过的最大电流，用 I_N 表示；额定功率则是指电气设备正常工作时的输入功率或输出功率，用 P_N 表示。

并不是当电压、电流或功率刚刚超过额定值时，就会立即损坏电气设备，只有当超出额定值很多时，才会出现这种情况。但是无论超出多少，设备的使用寿命都会受到影响。以电动机为例，当它的输出功率为额定值时，其使用寿命可达 10~20 年；当输出功率为额定值的 125% 时，其使用寿命会锐减为一个半月；当输出功率为额定值的 150% 时，运行几个小时就会因过热而损坏。

但是，一般也不应使电气设备在低于额定值的状态下运行。例如，当白炽灯的工作电压低

于额定电压时,亮度不够;当电动机的工作电压低于额定电压时,转速会下降。

因此,各种电气设备都应在额定状态下运行。

一般来说,当设备的工作电流等于额定电流时,称为满载;当工作电流大于额定电流时,称为过载或超载;当工作电流低于额定电流时,称为欠载或轻载。应尽量使电气设备在满载状态下运行。

除了额定电压、额定电流和额定功率外,有些电气设备还有一些特殊要求,例如半导体二极管的反向击穿电压、电动机的额定转速和额定温升等。

第三节 电 阻 元 件

电路中的基本元件有电阻、电容、电感以及电源,它们是构成电路的基本单元,因此研究它们的物理特性是电路分析的基础。本节首先介绍电阻元件。

一、电阻

电流通过导体时,通常要受到阻力,我们把这种阻力叫做电阻。电阻用 R 表示,单位为欧[姆],符号为 Ω 。

不同的导体对电流的阻力不同。实验证明,在一定温度下,截面均匀的导体的电阻与导体的长度成正比,与导体的截面积成反比,还与导体的材料有关,即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-13)$$

式中 l ——导体的长度,单位为米(m);

S ——导体的截面积,单位为平方米(m^2);

ρ ——导体的电阻率,也叫电阻系数,单位为欧米($\Omega \cdot \text{m}$)。

不同的导体有不同的电阻率。银的电阻率最小,是最好的导电材料。铜、铝次之。但由于银的价格昂贵,较少应用。工程中普遍采用的是铜和铝。由于合金的电阻率较大,有些情况下也用合金,如电炉丝就是镍铬合金制成的。选用电阻材料时,可查阅有关手册。表 1-2 列出了几种常见材料在 20°C 时的电阻率以及它们的用途。

表 1-2 几种常见材料的电阻率(20°C)

材 料 名 称	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$	用 途
银	1.59×10^{-8}	导线镀银
铜	1.69×10^{-8}	导线
铝	2.65×10^{-8}	导线
铂	1.05×10^{-7}	热电偶或电阻温度计
钨	5.48×10^{-8}	灯丝
碳	10×10^{-6}	电刷