

773

2001-83
7446

面向 21 世纪

高等职业技术教育电子电工类系列教材

电工与工业电子学

主 编	江 魁	
副主编	唐惠龙	雷社厚
参 编	梁洪洁	蹇军寿
	杨建丽	杨荣昌

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书是依据教育部最新制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》编写的。

全书分为两篇,第一篇电工学部分共有六章:直流电路、正弦交流电路、磁路和变压器、交流电动机、继电—接触器控制与可编程控制、工厂供电与安全用电;第二篇工业电子学部分共有五章:半导体二极管和整流滤波电路、半导体三极管及基本放大电路、直接耦合放大电路和集成运算放大器、晶闸管及其应用、数字电路基础。

本书可作为高等职业院校非电专业的教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工与工业电子学/江甦主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2002.2

面向 21 世纪高等职业技术教育电子电工类系列教材

ISBN 7-5606-1115-X

I. 电… II. 江… III. ①电工学—高等学校:技术学校—教材

②工业电子学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 003188 号

策 划 夏大平

责任编辑 戚文艳 张晓燕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安市第三印刷厂

版 次 2002 年 2 月第 1 版 2002 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.125

字 数 366 千字

印 数 1~4 000 册

定 价 18.00 元

ISBN 7-5606-1115-X/TM·0017(课)

XDUP 1386001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

本书是依据 1999 年 8 月教育部高教司制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》的精神,参照陕西省职业技术教育学会电子电工教学委员会组织讨论并确定的高等职业院校电子电工类专业“电工与工业电子学”教学大纲编写的,供高等职业院校非电专业使用。

此教材本着面向应用、面向发展的原则,本着培养学生与实践工作中观察问题和独立分析、解决问题的综合能力的目的,根据新大纲的要求,注意拓宽学生的知识面,尽量减少数学推导,降低理论深度;在新技术的发展如集成电路、可编程序控制器等方面适当增加了学时。在全书的编撰过程中,注意培养学生的自学能力和学生的综合能力(如通过查阅资料解决实际问题的能力等)。书中有“*”的章、节内容可根据专业需要作为选讲、选读内容。

本教材第 1、10、11 章由唐惠龙编写;第 6、7 章由雷社厚编写;第 5 章由梁洪洁编写;第 3 章由蹇军寿编写;第 2 章由杨建丽编写;第 4 章由杨荣昌编写;第 8、9 章由江魁编写。全书由江魁统稿。

本教材由郭宗智主审,在编写过程中,得到各学校的支持,在此一并致以衷心感谢。

由于编者水平有限,书中的错误和不妥之处,恳请使用本教材的兄弟学校师生和广大读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

第一篇 电 工 学

第 1 章 直流电路	1
1.1 电路的组成及基本物理量	1
1.2 欧姆定律、线性电阻、非线性电阻	3
1.3 电路的连接	5
1.4 电气设备的额定值、电路的几种状态	7
1.5 电压源、电流源及其等效变换	9
1.6 基尔霍夫定律及其应用	12
1.7 电路中电位的计算	13
1.8 戴维南定律	15
本章小结	16
思考题与习题	16
第 2 章 正弦交流电路	21
2.1 正弦交流电的基本概念	21
2.2 同频率正弦量的相加和相减	26
2.3 交流电路中的电阻、电容与电感	28
2.4 电阻、电感的串联电路	32
2.5 电阻、电感、电容串联电路及串联谐振	36
2.6 感性负载和电容器的并联电路——功率因数的补偿	37
2.7 三相交流电路	40
2.8 三相负载的连接	43
本章小结	47
思考题与习题	48
第 3 章 磁路和变压器	51
3.1 磁场的基本物理量	51
3.2 铁磁材料的磁性能	53
3.3 磁路和磁路欧姆定律	55
3.4 变压器	57
3.5 其它变压器	61
本章小结	63
思考题与习题	64
第 4 章 交流电动机	65
4.1 三相异步电动机的构造	65
4.2 三相异步电动机的基本原理	67
4.3 异步电动机的电磁转矩与机械特性	72
4.4 三相异步电动机的起动、调速和制动	76

4.5 三相异步电动机的铭牌和选择	80
4.6 其它用途的电动机	82
本章小结	86
思考题与习题	87
第5章 继电—接触器控制与可编程控制	88
5.1 常用低压电器	88
5.2 三相笼型异步电动机直接起动控制电路	96
5.3 三相笼型异步电动机的降压起动和制动控制	103
5.4 普通车床的控制电路	106
* 5.5 可编程控制	108
本章小结	120
思考题与习题	120
* 第6章 工厂供电与安全用电	124
* 6.1 电力系统的基本知识	124
6.2 工厂供电概述	126
6.3 触电	128
6.4 安全用电	130
6.5 节约用电	134
本章小结	135
思考题与习题	135

第二篇 工业电子学

第7章 半导体二极管与整流滤波电路	137
7.1 半导体的基本知识	137
7.2 PN结及其特性	141
7.3 半导体二极管	142
7.4 特殊二极管	145
7.5 整流电路	148
7.6 滤波电路	150
7.7 硅稳压管稳压电路	154
本章小结	156
思考题与习题	156
第8章 半导体三极管及基本放大电路	158
8.1 半导体三极管	158
8.2 放大电路的组成和基本工作原理	163
8.3 放大电路的基本分析方法(一)—工程估算法	166
8.4 放大电路的基本分析方法(二)—图解法	169
8.5 工作点稳定的放大电路	173
8.6 射极输出器	175
8.7 多级放大电路	177
8.8 功率放大器	179
本章小结	182

思考题与习题	183
第 9 章 直接耦合放大电路和集成运算放大器	186
9.1 直接耦合放大电路	186
9.2 集成电路基本知识	188
9.3 集成运算放大器的结构和指标	190
9.4 集成运放的应用基础	192
9.5 集成运放在信号运算方面的应用	195
9.6 信号转换电路	198
9.7 集成运放的非线性应用——电压比较器	199
9.8 专用集成电路	202
本章小结	206
思考题与习题	206
* 第 10 章 晶闸管及其应用	208
10.1 晶闸管的结构和工作原理	208
10.2 单相可控整流电路	211
10.3 晶闸管的触发电路	214
10.4 晶闸管的保护	217
10.5 双向晶闸管简介	220
10.6 晶闸管应用实例	220
本章小结	221
思考题与习题	221
第 11 章 数字电路基础	223
11.1 数制与编码	223
11.2 基本逻辑门电路	225
11.3 基本逻辑及应用	227
11.4 集成逻辑门电路	228
11.5 集成触发器	231
11.6 计数器	235
本章小结	237
思考题与习题	238
附录	240
参考文献	247

第一篇

电 工 学

第 1 章 直 流 电 路

1.1 电路的组成及基本物理量

1.1.1 电路的组成

电路是由各种电气器件按一定方式用导线连接组成的总体，它提供了电流通过的闭合路径。这些电气器件包括电源、开关、负载等。

图 1-1 为一最简单的电路。图中，电源为电池组 E ，电源内部的电路称为内电路。负载为电灯，负载、连接导线和开关 S 组成外电路。

电源是把其它形式的能量转换为电能的装置，例如，发电机将机械能转换为电能。负载是取用电能的装置，它把电能转换为其它形式的能量。例如，电动机将电能转换为机械能，电热炉将电能转换为热能，电灯将电能转换为光能。

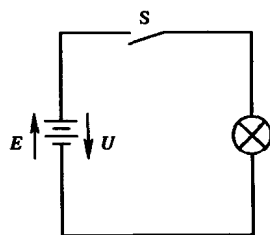


图 1-1 简单电路

导线和开关用来连接电源和负载，为电流提供通路，把电源的能量供给负载，并根据负载需要接通和断开电路。

电路的功能和作用有两类：第一类功能是进行能量的转换、传输和分配；第二类功能是进行信号的传递与处理。例如，扩音机的输入是由声音转换而来的电信号，通过晶体管组成的放大电路，输出的便是放大的电信号，从而实现了放大功能；电视机可将接收到的信号，经过处理，转换成图像和声音。

1.1.2 电路的基本物理量

1. 电流

电流是由电荷的定向移动而形成的。当金属导体处于电场之内时,自由电子要受到电场力的作用,逆着电场的方向作定向移动,这就形成了电流。

其大小和方向均不随时间变化的电流叫恒定电流,简称直流。

电流的强弱用电流强度来表示,对于恒定直流,电流强度 I 用单位时间内通过导体截面的电量 Q 来表示,即

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

电流的单位是 A(安[培])。在 1 秒内通过导体横截面的电荷为 1 C(库仑)时,其电流则为 1 A。

计算微小电流时,电流的单位用 mA(毫安)、 μ A(微安)或 nA(纳安),其换算关系为:

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

习惯上,规定正电荷的移动方向表示电流的实际方向。在外电路,电流由正极流向负极;在内电路,电流由负极流向正极。

在简单电路中,电流的实际方向可由电源的极性确定,在复杂电路中,电流的方向有时事先难以确定。为了分析电路的需要,我们便引入了电流的参考正方向的概念。在进行电路计算时,先任意选定某一方向作为待求电流的正方向,并根据此正方向进行计算,若计算得到结果为正值,说明了电流的实际方向与选定的正方向相同;若计算得到结果为负值,说明电流的实际方向与选定的正方向相反。图 1-2 表示电流的参考正方向(图中实线所示)与实际方向(图中虚线所示)之间的关系。

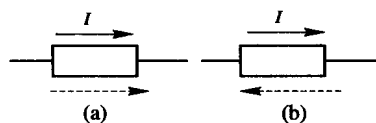


图 1-2 电流的方向

- (a) 参考正方向与实际方向一致;
(b) 参考正方向与实际方向相反

2. 电压

电场力把单位正电荷从电场中点 A 移到点 B 所做的功 W_{AB} 称为 A 、 B 间的电压,用 U_{AB} 表示,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-2)$$

电压的单位为 V(伏[特])。如果电场力把 1 C 电量从点 A 移到点 B 所作的功是 1 J(焦耳),则 A 与 B 两点间的电压就是 1 V。

计算较大的电压时用 kV(千伏),计算较小的电压时用 mV(毫伏)。其换算关系为:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, \quad 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点,即由“+”极指向“-”极,因此,在电压的方向上电位是逐渐降低的。

电压总是相对两点之间的电位而言的,所以用双下标表示,前一个下标(如 A)代表起

点, 后一个下标(如 B)代表终点。电压的方向则由起点指向终点, 有时用箭头在图上标明。当标定的参考方向与电压的实际方向相同时(图 1-3(a)), 电压为正值; 当标定的参考方向与实际电压方向相反时(图 1-3(b)), 电压为负值。

3. 电动势

为了维持电路中有持续不断的电流, 必须有一种外力, 把正电荷从低电位处(如负极 B)移到高电位处(如正极 A)。在电源内部就存在着这种外力。

如图 1-4 所示, 外力克服电场力把单位正电荷由低电位 B 端移到高电位 A 端, 所做的功称为电动势, 用 E 表示。

电动势的单位也是 V 。如果外力把 1 C 的电量从点 B 移到点 A , 所做的功是 1 J , 则电动势就等于 1 V 。

电动势的方向规定为从低电位指向高电位, 即由“-”极指向“+”极。

4. 电功率

在直流电路中, 根据电压的定义, 电场力所做的功是 $W = QU$ 。把单位时间内电场力所做的功称为电功率, 则有

$$P = \frac{QU}{t} = UI$$

功率的单位是 W (瓦[特])。

对于大功率, 采用 kW (千瓦)或 MW (兆瓦)作单位, 对于小功率则用 mW (毫瓦)或 μW (微瓦)作单位。

在电源内部, 外力做功, 使正电荷由低电位移向高电位, 电流逆着电场方向流动, 将其它能量转变为电能, 其电功率为

$$P = EI$$

若计算结果 $P > 0$, 说明该元件是耗能元件; 若计算结果 $P < 0$, 则该元件为供能元件。

当已知设备的功率为 P 时, 在 t 秒内消耗的电能为 $W = Pt$, 电能就等于电场力所作的功, 单位是 J (焦[耳])。在电工技术中, 往往直接用 $W \cdot s$ (瓦特秒)作单位, 实际上则用 $kW \cdot h$ (千瓦小时)作单位, 俗称 1 度电。 $1\text{ kW} \cdot h = 3.6 \times 10^6\text{ W} \cdot s$ 。

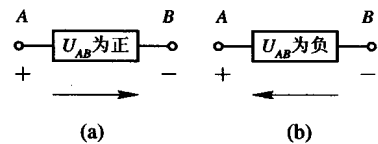


图 1-3 电压的正负与实际方向

(a) 参考正方向与实际方向一致;

(b) 参考正方向与实际方向相反

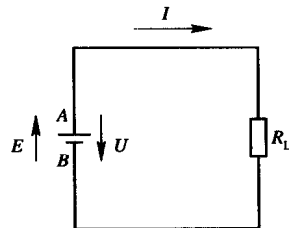


图 1-4 电动势

1.2 欧姆定律、线性电阻、非线性电阻

欧姆定律指出: 导体中的电流 I 与加在导体两端的电压 U 成正比, 与导体的电阻 R 成反比。

1.2.1 一段电路的欧姆定律

图 1-5 所示电路,是不含电动势,只含有电阻的一段电路。

若 U 与 I 正方向一致,则欧姆定律可表示为

$$U = IR \quad (1-3)$$

若 U 与 I 方向相反,则欧姆定律表示为

$$U = -IR$$

电阻的单位是 Ω (欧[姆]),计量大电阻时用 $k\Omega$ (千欧)或 $M\Omega$ (兆欧)。其换算关系为:

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

电阻的倒数 $1/R=G$,称为电导,它的单位为 S (西[门子])。

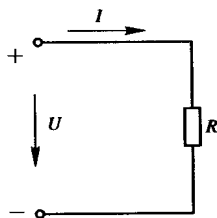


图 1-5 一段电路

1.2.2 全电路的欧姆定律

图 1-6 所示是简单的闭合电路, R_L 为负载电阻, R_0 为电源内阻,若略去导线电阻不计,则此段电路用欧姆定律可表示为

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} \quad (1-4)$$

式(1-4)的意义是:电路中流过的电流,其大小与电动势成正比,而与电路的全部电阻成反比。电源的电动势和内电阻一般认为是不变的,所以,改变外电路电阻,就可以改变回路中的电流大小。

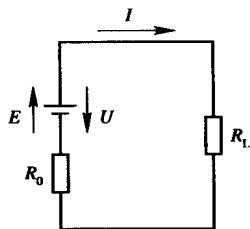


图 1-6 简单的闭合电路

1.2.3 线性电阻、非线性电阻

在温度一定的条件下,把加在电阻两端的电压与通过电阻的电流之间的关系称为伏安特性。

一般金属电阻的阻值不随所加电压和通过的电流而改变,即在一定的温度下其阻值是常数,这种电阻的伏安特性是一条经过原点的直线,如图 1-7 所示。这种电阻称为线性电阻。

由此可见,线性电阻遵守欧姆定律。

另一类电阻其电阻值随电压和电流的变化而变化,其电压与电流的比值不是常数,这类电阻称之为非线性电阻。例如,半导体二极管的正向电阻就是非线性的,它的伏安特性如图 1-8 所示。

半导体三极管的输入、输出电阻也都是非线性的。对于非线性电阻的电路,欧姆定律不再适用。

全部由线性元件组成的电路称为线性电路。本章仅讨论线性直流电路。

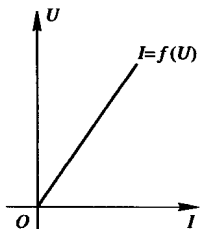


图 1-7 线性电阻的伏安特性

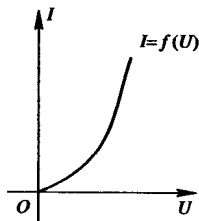


图 1-8 二极管正向伏安特性

1.3 电路的连接

由于工作的需要,常将许多电路按不同的方式连接起来,组成一个电路网络。

1.3.1 电阻的串联

由若干个电阻顺序地连接成一条无分支的电路,称为串联电路。如图 1-9 所示电路,是由三个电阻串联组成的。

电阻元件串联有以下几个特点:

(1) 流过串联各元件的电流相等,即 $I_1 = I_2 = I_3$;

(2) 等效电阻 $R = R_1 + R_2 + R_3$;

(3) 总电压 $U = U_1 + U_2 + U_3$;

(4) 总功率 $P = P_1 + P_2 + P_3$;

(5) 电阻串联具有分压作用,即 $U_1 = \frac{R_1 U}{R}$, $U_2 = \frac{R_2 U}{R}$, $U_3 = \frac{R_3 U}{R}$ 。

在实际中,利用串联分压的原理,可以扩大电压表的量程,还可以制成电阻分压器。

例 1.1 现有一表头,满刻度电流 $I_G = 50 \mu\text{A}$,表头的电阻 $R_G = 3 \text{ k}\Omega$,若要改装成量程为 10 V 的电压表,如图 1-10 所示,试问应串联一个多大的电阻?

解 当表头满刻度时,它的端电压为 $U_G = 50 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^3 = 0.15 \text{ V}$ 。设量程扩大到 10 V 时所需串联的电阻为 R ,则 R 上分得的电压为 $U_R = 10 - 0.15 = 9.85 \text{ V}$,故

$$R = \frac{U_R R_G}{U_G} = \frac{9.85 \times 3 \times 10^3}{0.15} = 197 \text{ k}\Omega$$

即应串联 $197 \text{ k}\Omega$ 的电阻,方能将表头改装成量程为 10 V 的电压表。

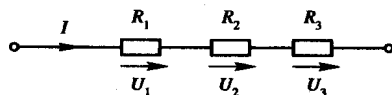


图 1-9 电阻的串联

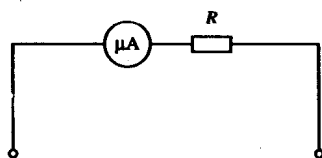


图 1-10 例 1.1 图

1.3.2 电阻的并联

将几个电阻元件都接在两个共同端点之间的连接方式称之为并联。图 1-11 所示电路是由三个电阻并联组成的。

并联电路的基本特点是：

(1) 并联电阻承受同一电压，即 $U = U_1 = U_2 = U_3$ ；

(2) 总电流 $I = I_1 + I_2 + I_3$ ；

(3) 总电阻的倒数

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

即总电导 $G = G_1 + G_2 + G_3$ ；

若只有两个电阻并联，其等效电阻 R 可用下式计算：

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

式中，符号“//”表示电阻并联。

(4) 总功率 $P = P_1 + P_2 + P_3$ ；

(5) 分流作用：

$$I_1 = \frac{RI}{R_1}, \quad I_2 = \frac{RI}{R_2}, \quad I_3 = \frac{RI}{R_3}$$

利用电阻并联的分流作用，可扩大电流表的量程。在实际应用中，用电器在电路中通常都是并联运行的，属于相同电压等级的用电器必须并联在同一电路中，这样，才能保证它们都在规定的电压下正常工作。

例 1.2 有三盏电灯接在 110 V 电源上，其额定值分别为 110 V、100 W，110 V、60 W，110 V、40 W，求总功率 P 、总电流 I 以及通过各灯泡的电流及等效电阻。

解

(1) 因外接电源符合各灯泡额定值，各灯泡正常发光，故总功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 100 + 60 + 40 = 200 \text{ W}$$

(2) 总电流与各灯泡电流为：

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200}{110} \approx 1.82 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{100}{110} \approx 0.909 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{60}{110} \approx 0.545 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} = \frac{40}{110} \approx 0.364 \text{ A}$$

(3) 等效电阻为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{110}{1.82} \approx 60.4 \Omega$$

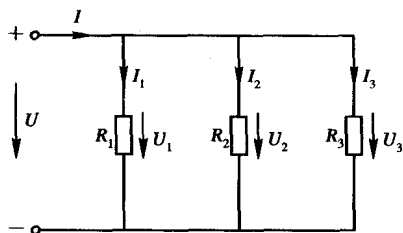


图 1-11 电阻的并联

1.4 电气设备的额定值、电路的几种状态

1.4.1 额定值

连接导线以及电动机、变压器等电气设备的导电部分都具有一定的电阻，它们在工作时，电流流过导体使一部分电能转变为热能而损耗。通常把这部分能量损耗称为铜耗。由于铜耗的存在，降低了电气设备的效率，并使设备的温度升高。连接导线和电气设备都具有绝缘部分，由于材料的绝缘水平、机械强度等性能具有一定的范围，因此，电气设备工作时，温度不能太高，如果温度过高，绝缘材料就会很快变脆损坏，甚至引起事故。所以，电气设备工作时都规定了最高允许温度。例如，橡胶绝缘的最高温度为 65°C ，电缆的最高允许温度为 $50\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，电动机的最高允许温度一般为 120°C 。

电气设备开始工作时，温度逐渐上升，同时，有部分热量散发到周围介质中去，随着电气设备与周围介质温差的增大，热量散发加快，直到单位时间内设备所产生的热量与散发的热量相等，温度不再升高，此时，电气设备的温度称为稳定温度。

电气设备的额定值，通常有如下几项：

(1) 额定电流(I_N)：电气设备长时间运行以致稳定温度达到最高允许温度时的电流，称为额定电流。

(2) 额定电压(U_N)：为了限制电气设备的电流并考虑绝缘材料的绝缘性能等因素，允许加在电气化设备上的电压限值，称为额定电压。

(3) 额定功率(P_N)：在直流电路中，额定电压与额定电流的乘积就是额定功率，即

$$P_N = U_N \cdot I_N$$

电气设备的额定值都标在铭牌上，使用时必须遵守。例如，一盏日光灯，标有“220 V 60 W”的字样，表示该灯泡在 220 V 电压下使用，消耗功率为 60 W，若将该灯泡接在 380 V 的电源上，则会因电流过大将灯丝烧毁；反之，若电源电压低于额定值，虽能发光，但灯光暗淡。

1.4.2 电路的几种状态

电路在工作时有三种工作状态，分别是通路、短路、断路。

1. 通路(有载工作状态)

如图 1-12 所示，当开关 S 闭合，使电源与负载接成闭合回路，电路便处于通路状态。在实际电路中，负载都是并联的，用 R_L 代表等效负载电阻。

电路中的用电器是由用户控制的，而且是经常变动的。当并联的用电器增多时，等效电阻 R_L 就会减小，而电源电动势 E 通常为一定值，且内阻 R_0 很小，电源端电压 U 变化很小，则电源输出的电流和功率将随之增大，这时称为电路的负载增大。当并联的用电器减少时，等效负载电阻 R_L 增大，电源输出的电流和功率将随之减小，这种情况称

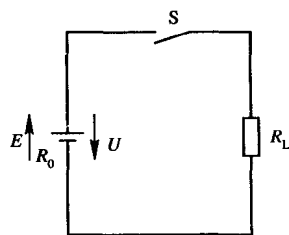


图 1-12 通路的示意图

为负载减小。可见，所谓负载增大或负载减小，是指增大或减小负载电流，而不是增大或减小电阻值。

电路中的负载是变动的，所以，电源端电压的大小也随之改变。电源端电压 U 随电源输出电流 I 的变化关系，即 $U = f(I)$ 称为电源的外特性，外特性曲线如图 1-13 所示。

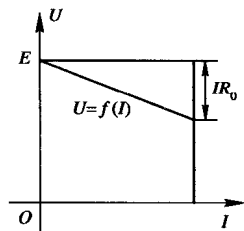


图 1-13 电源的外特性

根据负载大小，电路在通路时又分为三种工作状态：

当电气设备的电流等于额定电流时称为满载工作状态；
当电气设备的电流小于额定电流时，称为轻载工作状态；
当电气设备的电流大于额定电流时，称为过载工作状态。

2. 断路

所谓断路，就是电源与负载没有构成闭合回路。在图 1-12 所示电路中，当 S 断开时，电路即处于断路状态。断路状态的特征是：

$$R = \infty, \quad I = 0$$

电源内阻消耗功率

$$P_E = 0$$

负载消耗功率

$$P_L = 0$$

路端电压

$$U_0 = E$$

此种情况，也称为电源的空载。

3. 短路

所谓短路，就是电源未经负载而直接由导线接通成闭合回路，如图 1-14 所示。图中折线是指明短路点的符号。短路的特征是：

$$R = 0, \quad U = 0$$

$$I_s = \frac{E}{R_0} \quad (\text{短路电流})$$

$$P_L = 0$$

$$P_E = I_s^2 R_0 \quad (\text{电源内阻消耗功率})$$

因为电源内阻 R_0 一般都很小，所以短路电流 I_s 总是很大。如果电源短路事故未迅速排除，很大的短路电流将会烧毁电源、导线及电气设备，所以，电源短路是一种严重事故，应严加防止。

为了防止发生短路事故，以免损坏电源，常在电路中串接熔断器。熔断器中装有熔丝。熔丝是由低熔点的铅锡合金丝或铅锡合金片做成的。一旦短路，串联在电路中的熔丝将因发热而熔断，从而保护电源免于烧坏。

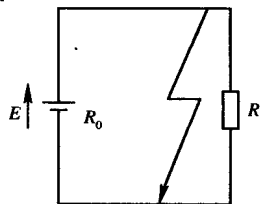


图 1-14 短路的示意图

熔断器的符号如图 1-15 所示，熔断器在电路中的接法如图 1-16 所示。

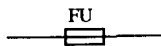


图 1-15 熔断器的符号

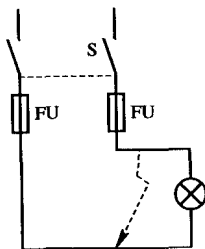


图 1-16 熔断器在电路中的安装

1.5 电压源、电流源及其等效变换

1.5.1 电压源

铅蓄电池及一般直流发电机等都是电源，它们是具有不变的电动势和较低内阻的电源，我们称其为电压源，如图 1-17(a)所示。如果电源的内阻 $R_0 \approx 0$ ，当电源与外电路接通时，其端电压 $U = E$ ，端电压不随电流而变化，电源外特性曲线是一条水平线。这是一种理想情况，我们把具有不变电动势且内阻为零的电源称为理想电压源或恒压源，如图 1-17(b)所示。

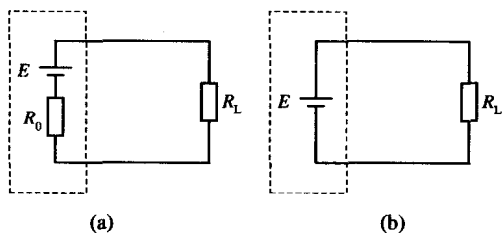


图 1-17 电压源

(a) 电压源与负载连接；(b) 恒压源与负载连接

理想电压源是实际电源的一种理想模型。例如，在电力供电网中，对于任何一个用电器（如一盏灯）而言，整个电力网除了该用电器以外的部分，就可以近似地看成是一个理想电压源。

当电源电压稳定在它的工作范围内，该电源就可认为是一个恒压源。如果电源的内电阻远小于负载电阻 R_L ，那么随着外电路负载电流的变化，电源的端电压可基本保持不变，这种电源就接近于一个恒压源。

1.5.2 电流源

对实际电源，可以建立另一种理想模型，叫电流源。如果电源输出恒定的电流，即电流的大小与端电压无关，我们把这种电源叫理想电流源。

对于直流电路来说，理想电流源输出恒定不变的电流 I_s ，它与外电路负载大小无关，其端电压由负载决定。理想电流源简称电流源或恒流源，如图 1-18 所示。恒流源的伏安特性如图 1-19 所示。

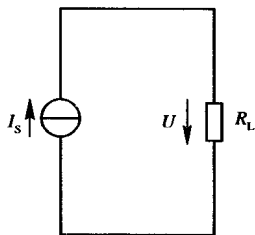


图 1-18 恒流源与负载连接

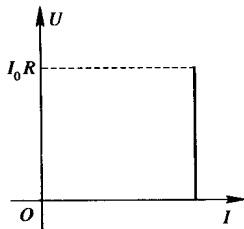


图 1-19 恒流源的伏安特性

当电流源与外电路接通时，回路电流是恒定的。实际的电流源即使没有与外电路接通，其内部也有电流流动；与负载接通后，电源内部仍有一部分电流流动，另一部分电流则通过负载，因此，实际电流源可以用理想电流源 I_s 与一个电阻 R_i 并联表示，如图 1-20 所示。

空载时，S 断开，通过 R_i 的电流 I_i 等于 I_s ，端电压为 $I_s R_i$ ，外电路电流 $I=0$ ；外电路短路时，端电压等于 0， $I=I_s$ ， $I_i=0$ ；有负载时， $U=I_i R_i = I R_L$ ， $I_i + I = I_s$ ，即

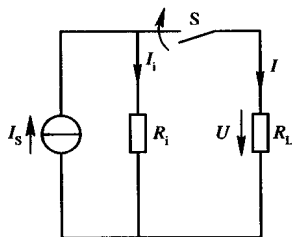


图 1-20 实际的电流源与负载连接

$$I = I_s - \frac{U}{R_i}$$

$$U = I_s R_i - I R_i$$

由上式可知：① 负载电流 I 总是小于恒流源输出电流 I_s ；② 负载电流增大，端电压减少；③ 负载电流愈小，内阻上的电流就愈大，内部损耗也就愈大，所以，电流源不能处于空载状态。

1.5.3 电压源与电流源的等效变换

一个实际的电源，既可以用理想电压源与内阻串联表示，也可以用一个理想电流源与内阻并联来表示。对于外电路而言，如果电源的外特性相同，无论采用哪种模型计算外电路电阻 R_L 上的电流、电压，结果都会相同。

对外电路而言，两种模型是可以等效变换的。试作对比如下：

电压源模型	电流源模型
$U = E - IR_0$	$U = I_s R_i - IR_i$
$I = \frac{E - U}{R_0}$	$I = I_s - \frac{U}{R_i}$

由以上比较可知，当满足下列关系时，两者可以互换：

$$R_i = R_0, \quad E = I_s R_i \quad \text{或} \quad I_s = \frac{E}{R_i}$$

电压源与电流源的等效变换电路如图 1-21 所示。关于两者的等效变换，我们有如下的结论：

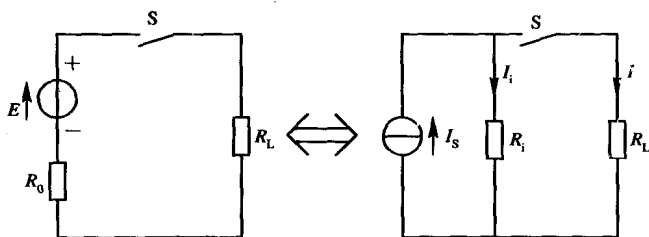


图 1-21 电压源与电流源的等效变换

(1) 电压源与电流源的等效变换只能对外电路等效，对内电路则不等效。

(2) 把电压源变换为电流源时，电流源中的 I_s 等于电压源输出端短路电流 I_s ， I_s 方向与电压源对外电路输出电流方向相同，电流源中的并联电阻 R_i 与电压源的内阻 R_0 相等。

(3) 把电流源变换成为电压源时，电压源中的电动势 E 等于电流源输出端断路时的端电压， E 的方向与电流源对外输出电流的方向相同，电压源中的内阻 R_0 与电流源的并联电阻 R_i 相等。

(4) 理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。

例 1.3 已知两个电压源， $E_1 = 24 \text{ V}$ ， $R_{01} = 4 \Omega$ ； $E_2 = 30 \text{ V}$ ， $R_{02} = 6 \Omega$ ，将它们同极性相并联，试求其等效电压源的电动势和内电阻 R_0 。

解 如图 1-22 所示，先将两个电压源分别等效变换为电流源：

$$I_{s1} = \frac{E_1}{R_{01}} = \frac{24}{4} = 6 \text{ A}$$

$$I_{s2} = \frac{E_2}{R_{02}} = \frac{30}{6} = 5 \text{ A}$$

将两个电流源合并为一个等效电流源：

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = 6 + 5 = 11 \text{ A}$$

$$R_0 = \frac{R_{01} \times R_{02}}{R_{01} + R_{02}} = 2.4 \Omega$$