



中等职业教育“十一五”规划教材
中职中专机械类教材系列

陈少斌 / 主 编
李新生 / 主 审

电工学



科学出版社
www.sciencep.com

● 中等职业教育“十一五”规划教材

中职中专机械类教材系列

电 工 学

陈少斌 主 编

姚 焱 李石元 乔清合 刘 丽 副主编

李新生 主 审

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书着重介绍了电工学基本原理以及电器自动控制基本线路。

全书共分五章，第一章介绍直流电路基础；第二章介绍磁与电磁；第三章叙述正弦交流电路；第四章重点阐述机床常用控制线路，是全书的核心；第五章简述电子电路基础。本书从培养学生的实际动手能力出发，兼顾理论知识的教学要求，突出理论联系实际。

本书可作为中等职业学校非电类专业教材，也可供职业培训及机床电器维修人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学 / 陈少斌主编. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019677-4

I. 电… II. 陈… III. 电工学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 127700 号

责任编辑: 李昱颀 / 责任校对: 柏连海

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2007 年 9 月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 1—3 500 字数: 180 000

定价: 11.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137154(VT03)

本书是根据中等专科机械类专业指导委员会审定的教学大纲，为非电类专业学生编写的教学用书。

为了实施新的教学计划，适应市场经济需要，我们进行了课程整合。本书内容包括直流电路、磁与电磁、交流电路、常用机床控制线路、电子电路基础。每章后附有小结和习题。本课程学时数为 60 学时。

本书的内容结合专业特点，注重理论联系实际及培养应用型工程技术人才，突出实用性。本书以单相、三相交流电路，常用机床控制线路为重点章节，突出了机床电器控制的原理与应用。

本书由陈少斌担任主编，姚焱、李石元、乔清合、刘丽担任副主编，李新生任主审。参加本书编写的还有程来星、张易、蔡玲芳、郝兵、唐元鸿、刘宁和陈金水等。本书在编写的过程中得到了湖北机械工业学校上级有关领导的指导以及兄弟院校的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 直流电路基础	1
1.1 电路及基本物理量	1
1.1.1 电路及电路图	1
1.1.2 电路中几个物理量	2
1.2 欧姆定律及其应用	7
1.2.1 部分电路欧姆定律	7
1.2.2 全电路欧姆定律	8
1.2.3 电路的三种状态	8
1.3 电功与电功率	10
1.3.1 功与功率	10
1.3.2 焦耳-楞次定律	11
1.3.3 负载的额定值	12
1.4 电阻的串联、并联及应用	13
1.4.1 电阻的串联	13
1.4.2 电阻的并联	16
1.4.3 电阻的混联	17
1.5 基尔霍夫定律	18
1.5.1 支路、节点、回路	18
1.5.2 基尔霍夫第一定律	19
1.5.3 基尔霍夫第二定律	20
小结	20
习题	21
第 2 章 磁与电磁	24
2.1 磁场的基本知识	24
2.1.1 磁铁及其性质	24
2.1.2 电流的磁场	25
2.2 磁场对电流的作用	26



2.2.1	磁场对通电直导体的作用	26
2.2.2	磁感应强度	27
2.2.3	磁通	28
2.2.4	磁场对通电线圈的作用	28
2.3	电磁感应定律	29
2.3.1	电磁感应现象及其产生条件	29
2.3.2	楞次定律	31
2.3.3	法拉第电磁感应定律	31
2.3.4	自感现象与自感系数	32
2.3.5	互感现象、互感电动势、同名端	33
	小结	35
	习题	36
第3章	正弦交流电路	38
3.1	正弦交流电的基本概念	38
3.1.1	交流电概念	38
3.1.2	正弦交流电的产生	38
3.1.3	正弦交流电三要素	39
3.2	正弦交流电的表示方法	43
3.2.1	解析法	44
3.2.2	波形图	44
3.2.3	矢量图表示法	44
3.3	单相交流电路	46
3.3.1	纯电阻电路	46
3.3.2	纯电感电路	47
3.3.3	纯电容电路	50
3.3.4	电阻与电感的串联电路	52
3.4	三相交流电的概念	56
3.4.1	三相交流电的基本概念	56
3.4.2	三相电动势的产生	56
3.4.3	三相负载的连接方式	58
3.5	变压器	62
3.5.1	变压器的用途及其基结构	62
3.5.2	工作原理	63
	小结	64
	习题	65

第4章 机床常用控制线路	68
4.1 三相异步电动机	68
4.1.1 三相异步电动机的转动原理	68
4.1.2 三相异步电动机的基本结构	70
4.1.3 三相异步电动机的接法	71
4.1.4 三相异步电动机的铭牌	72
4.2 常用低压电器	73
4.2.1 低压电器的基本知识	73
4.2.2 控制与保护电器	74
4.3 电气控制线路原理图的基本知识	83
4.3.1 电气图常用图形符号及文字符号	83
4.3.2 电气元器件工作状态的表示法	84
4.3.3 电气控制线路的组成	85
4.3.4 识读电路图的一般方法和步骤	86
4.4 三相笼型异步电动机的直接起动控制线路	87
4.4.1 点动控制线路	87
4.4.2 接触器自锁控制线路	88
4.4.3 具有过载保护的自锁控制线路	89
4.5 三相笼型异步电动机的正反转控制线路	90
4.6 位置控制线路	91
4.7 顺序控制与多地控制线路	93
4.7.1 顺序控制线路	93
4.7.2 多地控制线路	95
4.8 三相笼型异步电动机降压起动控制线路	95
4.9 三相笼型异步电动机的制动控制线路	97
4.10 电动机的保护及电气控制系统在运行中的常见故障	99
4.10.1 电动机的保护	99
4.10.2 常见故障及简易处理方法	100
小结	101
习题	102
第5章 电子电路基础	104
5.1 常用半导体器件	104
5.1.1 晶体二极管	104
5.1.2 晶体三极管	105
5.2 整流与滤波电路	108

• vi •

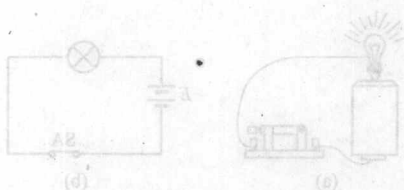


图 1.1 简单直流电路

第 1 章

直流电路基础

图 1.1 简单直流电路

1.1 电路及基本物理量



1.1.1 电路及电路图

电流流经的闭合路径称为电路。

1. 电路的组成

简单的电路是由电源、负载、导线组成的闭合回路。一般电路还包括开关、熔断器、继电器等电器控制元件。

1) 电源：把其他形式的能量转变成电能的装置称为电源，常见的直流电源包括干电池、蓄电池等，生产和生活中最熟悉的是 50Hz (工频)、380/220V 的交流电源。

2) 负载：把电能转变成其他形式能量的装置称为负载，又名用电器，例如，电灯、电铃、电动机、电炉等利用电能工作的设备都为电源的负载。

3) 导线：连接电源与用电器和其他电器元件的金属线称为导线，常用的导线包括铜、铝导线等。

4) 电器控制元件。对电路进行控制的电器元件称为电路控制元件，例如，常用电器开关是对电路进行通或断控制的电器元件；熔断器是对电源和负载进行保护的电器元件。

2. 电路图

用国家统一规定的符号来表示电路连接情况的图称为电路图。图 1.1 (a) 所示为由于电池、小电珠、开关和连接导线等实物连接的电路。图 1.1 (b) 所示为



用图形符号画成的电路图。

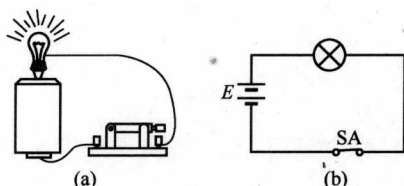


图 1.1 电路和电路图

表 1.1 为电路图中一些常用的图形符号。

表 1.1 常用电路符号

名 称	符 号	名 称	符 号
电 阻		电压表	
电 池		接 地	
电 灯		熔断器	
开 关		电 容	
电流表		电 感	

3. 电路的三种工作状态

- 1) 通路（闭路）：电路构成闭合回路，有电流通过。如图 1.1 所示，当开关合上时，有电流流过灯泡，灯泡发亮，称为通路状态。
- 2) 开路（断路）：电路断开，电路中没有电流通过。如图 1.1 所示，当开关断开时，没有电流流过灯泡，灯泡不发亮，称为开路状态。
- 3) 短路：当电源两端用导线直接相连，这时电源输出的电流不经过负载，只经过连接导线直接流回电源，这种状态称为短路状态，简称短路。一般情况下，短路时大电流会损坏电源和导线，应该尽量避免。



1.1.2 电路中几个物理量

1. 电流

电荷的定向移动形成电流。例如，金属导体中自由电子在电场力作用下的定向移动，电解液中正、负离子在电场力作用下的移动，阴极射线管中的电子流等，都形成电流。

- 1) 电流的大小：用 I 表示，在数值上等于单位时间内通过导体某横截面的电荷

量。如果在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 q ，那么电流为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.1)$$

2) 电流的单位：在国际单位制中，电流的单位是 A（安培）。如果在 1s（秒）内通过导体横截面的电荷量是 1C（库仑），则规定导体中的电流为 1A。常用的电流的单位还有 kA（千安）、mA（毫安）、 μ A（微安）等，换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

3) 电流的方向：电流不仅有大小，而且有方向。习惯上规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。在金属导体中电流的方向与自由电子（自由电子所带的电荷为负电荷）定向移动的方向相反，在电解液中电流的方向与正离子的移动方向相同，与负离子的移动方向相反。

4) 电流的种类：电流方向和大小都不随时间而改变的电流称为直流电流，又称为稳恒电流。电流的方向和大小都随时间作周期性变化的电流称为交流电流。

5) 电流的测量：电路中的电流大小可用电流表（安培表）进行测量，如图 1.2 所示。测量时应注意以下几点：①对交、直流电流应分别使用交流电流表和直流电流表；②电流表必须串联到被测量的电路中；③直流电流表表壳接线柱上标明的“+”、“-”记号，应和电路的极性相一致，不能接错，否则指针要反转，既影响正常测量，也容易损坏电流表；④合理选择电流表的量程。如果量程选用不当，如用小量程电流表去测量大的电流时，就会烧坏电流表；若用大量程电流表去测量小电流会影响测量的准确度。一般要先估计被测量电流的大小，再选择电流表的量程。若无法估计，可先用电流表的最大量程挡测量，当指针偏转不到 1/3 刻度时，再改用较小挡去测量，直到测得正确数值为止。

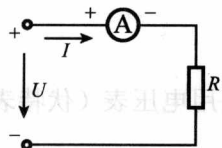


图 1.2 直流电流的测量



图 1.3 电流的正负

2. 电流密度

在实际工作中，有时要选择导线的粗细（横截面），这就涉及电流密度这一概念。所谓电流密度是指当电流在导体的截面上均匀分布时，该电流与导体横截面积的比值。电流密度用字母 J 表示，其数学表达式为

$$J = \frac{I}{S} \quad (1.2)$$

式中,当电流用 A 作为单位、横截面积用 mm^2 作单位时,电流密度的单位是 A/mm^2 。

选择合适的导线横截面积就是使导线的电流密度在允许的范围内,保证用电量和用电安全。导线允许的电流密度随导体横截面积的不同而不同。例如,横截面积为 1mm^2 和 2.5mm^2 的铜导线取 $J=6\text{A}/\text{mm}^2$ 。当导线中通过的电流超过允许值时,导线将发热,甚至着火发生事故。

例 1.1 某照明电路需要通过 21A 的电流,至少需要采用多粗的铜导线?(设 $J=6\text{A}/\text{mm}^2$)

解:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{21}{6} \text{mm}^2 = 3.5 \text{mm}^2$$

3. 电压

电荷在电场力的作用下定向移动,形成电流。电场力对电荷的定向移动要作功。为了衡量电场力作功能力的大小,引入电压这个物理量。

1) 电压公式:电压又称为电位差。如图 1.4 所示,在电场中若电场力将点电荷 Q 从 A 点移动到 B 点,所做的功为 W_{AB} ,则 W_{AB} 与 Q 的比值就称为该两点之间的电压,用带双下标的符号 U_{AB} 表示,其数学表达式为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1.3)$$

2) 电压单位:在国际单位制中,电压的单位是 V (伏特)。如果电场力将 1 库仑的电荷从 A 点移动到 B 点,所做的功是 1J (焦耳),则 AB 两点之间的电压大小就是 1V。除 V 以外,常用的电压单位还有 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏)。

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}$$

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

$$1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

3) 电压的测量:电路中任意两点之间的电压大小可以用电压表 (伏特表) 进行测量,如图 1.5 所示。

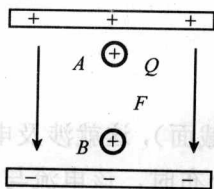


图 1.4 电场力作功



图 1.5 直流电压的测量

测量时应注意以下几点：①对交、直流电压应分别采用交流电压表和直流电压表；②电压表必须并联在被测电路的两端；③直流电压表表壳接线柱上标明的“+”、“-”记号，应和被测两点的电位相一致，即“+”端接高电位，“-”端接低电位，不能接错，否则指针要反转，并会损坏电压表。

合理选择电压表的量程，其方法和电流表相同。

4) 电压方向：从高电位指向低电位。对于负载来说，规定电流流进端为电压的正端，电流流出端为电压的负端。电压的方向由正指向负。

电压的方向在电路图中有两种表示方法，一种用箭头表示，如图 1.6 (a) 所示；另一种用极性符号表示，如图 1.6 (b) 所示。

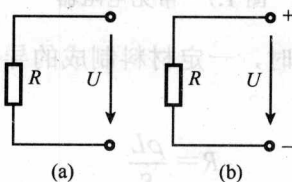


图 1.6 电压的方向

4. 电位

在电路中，如果将某点定为参考点，则电路中各点相对于参考点的电压，就称为该点的电位。用符号 V 加上一脚标表示，如电路中 A 点电位就用 V_A 表示。

$$U_{A\#} = V_A - V_{\#}$$

则

$$V_A = U_{A\#} + V_{\#}$$

参考点的电位一般情况下规定为零， $V_{\#} = 0$ ；在电路中参考点虽说是任意选取，但一个电路中只能确定一个点为参考点；通常情况下把电路中的接地点作为参考点。

$$\text{因为 } V_{\#} = 0 \quad \text{所以 } V_A = U_{A\#}$$

了解了电位的概念，那么电路中 A 、 B 两点间的电压等于 A 、 B 两点电位之差，即

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

电位与电压既有联系又有区别，电位是相对的，它的大小与参考点的选择有关，而电压是绝对的，它的大小与参考点的选择无关。

电压的方向：由高电位指向低电位，即电位降低的方向。

5. 电阻

导体对电流的阻碍作用称为电阻，用符号 R 表示，常见电阻器如图 1.7 所示。

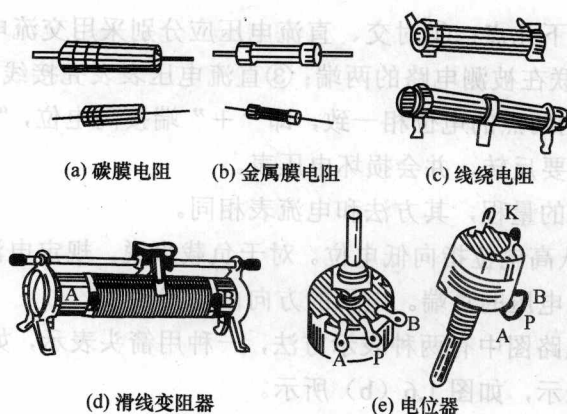


图 1.7 常见电阻器

1) 电阻定律：在温度不变时，一定材料制成的导体的电阻与它的长度成正比，跟它的横截面积成反比，即

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

式中， ρ 为导体的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ ； L 为导体的长度，单位是 m ； S 为导体的横截面积，单位是 m^2 。

导体的电阻率是由导体材料的性质所决定，同时与导体所处的条件（如温度）有关。在一定的温度下，同一种材料的电阻率 ρ 是常数。

在 20°C 情况下，银、铜、铝的电阻率分别为 $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、 $2.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

2) 电阻的单位：电阻的单位是 Ω （欧姆）。除 Ω 外，常用的电阻单位还有 $\text{k}\Omega$ （千欧）、 $\text{M}\Omega$ （兆欧），它们之间的换算关系为

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

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

导体的电阻是客观存在的，即使没有外加电压，导体仍然有电阻。

3) 电阻的测量：导体电阻的大小还可用电阻计（欧姆表）进行测量。测量时要注意：①切断电路上的电源，如图 1.8 (a) 所示；②使被测电阻的一端断开，如图 1.8 (b) 所示；③避免把人体的电阻量入，如图 1.9 所示。

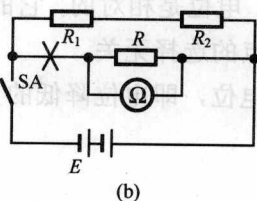
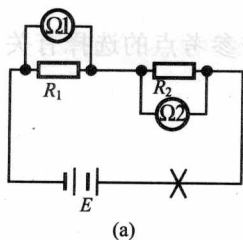


图 1.8 用欧姆表测量电阻

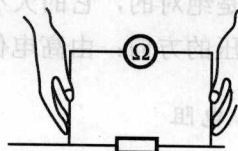


图 1.9 测量电阻时量入了人体电阻

1.2 欧姆定律及其应用

1.2.1 部分电路欧姆定律

部分电路欧姆定律的内容是：在不包含电源的电路（图 1.10）中，流过导体的电流与这段导体两端的电压成正比，与导体的电阻成反比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.4)$$

式中， I 为导体中的电流，单位 A； U 为导体两端的电压，单位为 V； R 为导体的电阻，单位为 Ω 。

欧姆定律揭示了电路中电流、电压、电阻三者之间的关系，是电路分析的基本定律之一，实际应用非常广泛。

例 1.2 已知某 100W 的白炽灯在电压 220V 时正常发光，此时通过的电流是 0.455A，试求该灯泡工作时的电阻。

解：

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.455} \Omega \approx 484 \Omega$$

例 1.3 有一个量程为 300V（即测量范围是 0~300V）的电压表，它的内阻 R_0 为 40k Ω 。用它测量电压时，允许流过的最大电流是多少？

解：根据题意，可画出电路的分析简图，如图 1.11 所示。由于电压表的内阻是一个定值，测量的电压越高，通过电压表的电流就越大。因此，当被测电压为 300V 时，该电压表中允许流过的最大电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{300}{40 \times 10^3} = 0.0075 \text{ A} = 7.5 \text{ mA}$$

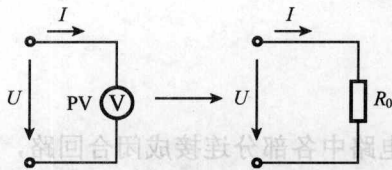


图 1.11 例 1.3 电路分析简图



1.2.2 全电路欧姆定律

全电路是指由内电路和外电路组成的闭合电路的整体,如图 1.12 所示。图中的虚线框代表一个电源的内部电路,称为内电路。电源内部一般都是有电阻的,这个电阻称为内电阻,简称内阻,用符号 r 或者 R_0 表示。内电阻也可以不单独画出,而在电源符号旁边注明内电阻的数值。电源外部的电路称为外电路。

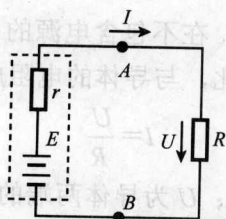


图 1.12 全电路

全电路欧姆定律的内容是:在全电路中电流强度与电源的电动势成正比,与整个电路的内、外电阻之和成反比。其数学表达式为

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1.5)$$

式中, E 为电源电动势, 衡量电源将非电能转换成电能本领的物理量, 电动势 E 的方向规定在电源内部由负极指向正极, 单位是 V; R 为外电路(负载)电阻, 单位是 Ω ; r 为内电路电阻, 单位是 Ω ; I 为电路中电流, 单位是 A。

由式 (1.5) 可得到

$$E = IR + Ir = U_{\text{外}} + U_{\text{内}} \quad (1.6)$$

式中, $U_{\text{内}} = Ir$ 是电源内阻两端的电压降; $U_{\text{外}} = IR$ 是电源外电路两端的电压降(电源的端电压), 也称负载两端的电压, 又称电源对外电路的输出电压。

全电路欧姆定律又可表述为: 电源电动势在数值上等于闭合电路中内、外电路电压降之和, 因所有电源都存在着内电阻, 所以 $U_{\text{外}} < E$, 即 $IR < E$ 。



1.2.3 电路的三种状态

1. 通路

电路呈通路状态时, 电路中各部分连接成闭合回路, 用电器中有电流通过。

如图 1.13 所示, 开关 SA 接通“1”号位置, 电路处于通路状态。电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R+r}$$

端电压与输出电流的关系为

$$U_{\text{外}} = E - U_{\text{内}} = E - Ir \quad (1.7)$$

式(1.7)表明:当电源电动势和内阻一定时,端电压随输出电流 I 的增大而下降。这种电源端电压随输出(负载)电流的变化关系,称为电源的外特性。其关系曲线称为电源的外特性曲线,如图1.14所示。

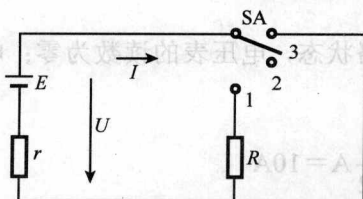


图 1.13 电路的三种状态

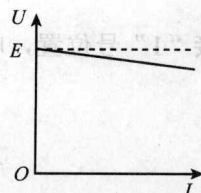


图 1.14 电源的外特性曲线

2. 开路

电路呈开路(断路)状态时,电路中无电流通过。这时电阻 R 变成无限大。

图1.13中,开关SA接通“2”号位置或电路中某处的连接导线断线,电路处于开路状态。由 $I = E/(R+r)$,负载电阻 $R \rightarrow \infty$,则电路中的电流 $I = 0$,内阻压降 $U_{\text{内}} = Ir = 0$, $U_{\text{外}} = E - Ir = E$,即电源的开路时,电源两端的电压等于电源电动势。

3. 短路

电路呈短路状态时,电阻 R 趋近于零。

图1.13中,开关SA接通“3”号位置,电源被短接,电路中短路电流 $I_{\text{短}} = E/r$ 。由于电源电阻一般都很小,所以 $I_{\text{短}}$ 极大,此时电源对外输出电压 $U = E - I_{\text{短}}r = 0$ 。

短路电流极大,不仅会损坏导线、电源和其他电器设备,甚至还会引起火灾,因此短路是严重的故障状态,必须严格禁止,避免发生。在电路中常串接保护装置,如熔断器等。一旦电路发生短路故障,能自动切断电路,起到安全保护作用。

电路三种状态下各物理量的关系如表1.2所示。

表 1.2 电路在三种状态下各物理量的关系

电路状态	电 流	电 压	电源消耗功率	负载功率
断路	$I = 0$	$U = E$	$P_E = 0$	$P_R = 0$
通路	$I = \frac{E}{R+r}$	$U = E - Ir$	$P_E = EI$	$P_R = UI$
短路	$I = I_{\text{短}} = \frac{E}{r}$	$U = 0$	$P_E = I_{\text{短}}^2 \cdot r$	$P_R = 0$