

DIAN GONG JI SHU

电工技术



贾端红 袁洪岭 主编



中国农业大学出版社



电工技术

贾端红 袁洪岭 主编

中国农业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/贾端红,袁洪岭主编.—北京:中国农业大学出版社,2004.8

ISBN 7-81066-798-X/TM·1

I. 电… II. ①贾… ②袁… III. 电工技术 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 077296 号

书 名 电工技术

作 者 贾端红 袁洪岭 主编

策划编辑 赵 中 **责任编辑** 张苏明 阚 春

封面设计 郑 川 **责任校对** 王晓凤

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号 **邮政编码** 100094

电 话 发行部 010-62731190,2620 **读者服务部** 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618 **出 版 部** 010-62733440

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup> **E-mail** caup@public.bta.net.cn

经 销 新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

版 次 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

规 格 787×980 16 开本 21.25 印张 384 千字

印 数 1~3 500

定 价 24.00 元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

前 言

“电工技术”是工科类各非电专业学生必修的一门重要的专业基础课,课程的主要目的是使学生了解使用电能的基本理论、基本方法和实际操作技能,为学生学习后续专业课程和今后从事专业技术工作打下坚实基础。

本书在从事多年电工学教学实践经验的基础上,根据教学科研中学生的反馈意见和学习要求而编写,内容精选。理论讲授以必须够用为度,避免复杂的公式推导,重点加强学生实践动手能力的培养,提高分析解决实际问题的能力;同时增加了 PLC 控制技术,以适应新技术的发展对学生提出的新要求。

全书共分 10 章,主要学习电路分析、电机及控制、工厂供电、常用电工材料、电工基本操作技能、安全用电及电工测量技术。在以往的教学过程中发现,有的学生从一开始就具有学习电工技术的兴趣和愿望,有的学生是在开始学习之后,才对学习电工技术产生强烈的兴趣,并积极主动地学习。如果学生在学习本教材之后学有所成、学有所能,作为编者将感到由衷的高兴。

本教材由贾端红、袁洪岭主编,齐保林、贾永红、葛飞副主编。参加编写者有袁洪岭(第 1,2 章,钟建华同志为绘制该部分的插图做了大量的工作,特致谢),齐保林(第 3 章),贾端红(第 4,6 章),胡晓波(第 5 章),葛飞(第 7 章),曹文思(第 8 章),王艳芳、刘士伟(第 9 章),贾永红(第 10 章)。

由于时间紧迫和编者水平有限,书中难免存在一些问题,敬请读者批评指正。

最后,对本书所引用的各参考文献的作者,及为本书的出版而付出巨大劳动的诸位编辑表示衷心的感谢。

编 者

2004 年 3 月

目 录

第 1 章 电路基础	(1)
§ 1-1 电路的组成及主要物理量	(1)
§ 1-2 电阻元件与欧姆定律	(6)
§ 1-3 电气设备的额定值和电路的几种状态	(9)
§ 1-4 基尔霍夫定律	(12)
§ 1-5 复杂电路的基本分析方法	(16)
§ 1-6 交流电的基本概念	(20)
§ 1-7 正弦量的相量表示	(25)
§ 1-8 单相正弦交流电路的分析计算	(32)
§ 1-9 三相交流电路的分析计算	(45)
习题 1	(56)
第 2 章 磁路与变压器	(64)
§ 2-1 磁路的基本知识和交流铁心线圈	(64)
§ 2-2 变压器的基本结构和工作原理	(69)
§ 2-3 变压器的特性和额定值	(76)
§ 2-4 其他类型的变压器及应用	(78)
习题 2	(83)
第 3 章 异步电动机	(86)
§ 3-1 三相异步电动机的结构和工作原理	(86)
§ 3-2 三相异步电动机的转矩和机械特性	(96)
§ 3-3 三相异步电动机的使用	(103)
§ 3-4 单相异步电动机	(120)
§ 3-5 三相鼠笼式异步电动机的修理	(123)
习题 3	(140)
第 4 章 异步电动机的继电接触器控制	(143)
§ 4-1 常用低压电器	(143)
§ 4-2 三相笼型异步电动机直接起动控制电路	(152)
§ 4-3 三相笼型异步电动机正反转控制电路	(154)
§ 4-4 行程控制	(158)

§ 4-5 时间控制	(159)
§ 4-6 顺序联锁控制	(160)
§ 4-7 三相异步电动机基本控制电路的安装	(161)
§ 4-8 常用低压电器的检修	(166)
习题 4	(168)
第 5 章 可编程序控制器	(169)
§ 5-1 可编程序控制器的特点及分类	(170)
§ 5-2 可编程序控制器的结构与工作原理	(172)
§ 5-3 可编程序控制器的编程语言和编程元件	(178)
§ 5-4 可编程序控制器的编程及应用	(191)
习题 5	(198)
第 6 章 电工基本操作技术	(199)
§ 6-1 常用的电工工具	(199)
§ 6-2 导线的连接	(208)
第 7 章 电工材料	(224)
§ 7-1 常用导电材料	(224)
§ 7-2 常用绝缘材料	(241)
§ 7-3 常用磁性材料	(248)
§ 7-4 常用润滑油、润滑脂及滚动轴承	(252)
习题 7	(256)
第 8 章 工厂供电	(258)
§ 8-1 电力系统的基本概念	(258)
§ 8-2 工厂供配电系统和供配电电压	(262)
§ 8-3 工厂电力网络的基本接线方式	(267)
§ 8-4 车间内配电线路	(270)
习题 8	(277)
第 9 章 电工测量	(279)
§ 9-1 概述	(279)
§ 9-2 磁电式仪表和电磁式仪表	(282)
§ 9-3 电流和电压的测量	(286)
§ 9-4 电动式仪表及功率测量	(292)
§ 9-5 万用表、摇表和电桥	(301)
习题 9	(316)

第 10 章 安全用电	(317)
§ 10-1 电流对人体的作用	(317)
§ 10-2 电气安全技术知识	(321)
§ 10-3 电气设备的防火措施及灭火规则	(327)
§ 10-4 触电急救	(328)
习题 10	(331)
参考文献	(332)

第1章 电路基础

本章首先介绍电路的基本概念,包括电路的组成和作用、电路的基本物理量、电路的3种状态和设备额定值;然后讨论基尔霍夫两定律和常用的电路分析方法。

上述定律和分析方法,虽是在直流电路中提出,但辅以适当的数学工具也适用于正弦交流电路以及其他各种线性电路,故本章也将单相交流电路和三相电路一并纳入。本章的内容是学习电工技术课程的重要基础。

§ 1-1 电路的组成及主要物理量

一、电路的组成和作用

电路是电流的通路,它是为了实现某种功能,由各种电气设备和器件按一定方式互相连接而成的。电源、中间环节和负载是电路的基本组成部分。实际电路种类繁多,按其功能的不同,可以分为电力电路(或称强电电路)和信号电路(或称弱电电路)两大类。

图 1-1(a)所示是由 2 个干电池、1 个灯泡通过导线和 1 个开关所构成的手电筒电路。用电路符号表示后,电路如图 1-1(b)所示。图中 R 表示灯泡, E 表示电源电动势。

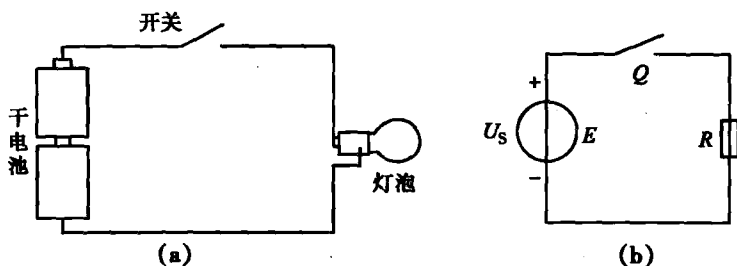


图 1-1 电路的组成

电路的基本作用各有不同,但其主要功能都是进行电能的转换、传输和分配,以及信号的传递和处理,下面举例说明。

1. 电能的转换、传输和分配

最典型的例子是电力系统。发电厂的发电机组把水能或热能转换成电能,通过变压器、输电线路传送给各用户,用户又把电能转换成机械能、热能或光能等。发电机称为发电设备;变压器、输电线路称为输电设备;把电能转换成机械能的电动机、转换成光能的电灯、转换成热能的电炉等称为用电设备,也称为负载。发电设备、输电设备、用电设备统称为电工设备,它们都是电路元件。

2. 信号的传递和处理

常见的例子很多,如扩音机把较弱的声音信号变成较强的信号;电视机接收各发射台发射的不同信号并进行放大、处理,转换成声音和图像;计算机也是由电路组成的,它可对键盘或其他输入设备输入的信号进行传递、处理,转换成图形或字符,输出在显示器或打印机上。所有这些都是通过电路把施加的输入信号变换成为所需要的输出信号。

在研究电路时,经常遇到“网络”这个名词。通常,网络的含义是从拓朴学观点考察电路。一般在研究复杂的电路问题时把电路称为网络,而在研究比较简单或某一具体电路时较多地使用电路这个名词。

二、电路中的主要物理量

1. 电流

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量。电流强度为单位时间内通过导体任一横截面的电荷量,工程上就简称为电流。电流不仅表示一种物理现象,而且还是一个物理量。常以字母 i 或 I 表示。

若设在 Δt 时间内通过导体截面的电量为 Δq ,则电流表示为

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

若电荷运动的速率是随时间变化的,此时电流是时间的函数,这种随时间变化的电流叫变动电流,瞬时值表示成

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

如果此电流随时间的变化是周期性的,则称其为周期电流。若周期电流满足

$$i = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0$$

T 为周期电流的周期,则称为交流电流,简称交流。

若电流不随时间变化,即在相同的时间间隔内通过的电量相等,则称为恒定电流,简称直流。直流电流表达式为

$$I = \frac{Q}{T}$$

在国际单位制中,电流的单位是安培(A),简称安。为了使用上的方便,常用的单位还有毫安(mA)、微安(μ A)、千安(kA),它们的关系是

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

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

2. 电位及电压

电位是相对于确定的参考点来说的。电路中某点 A 的电位是指单位正电荷在电场力作用下,自该点沿任意路径移动到参考点时电场力所做的功。 A 点的电位用 V_A 表示。

对电位来说,参考点是至关重要的。第一,电位是相对的物理量,不确定参考点,讨论电位就没有意义。第二,在同一电路中选定不同的参考点时,同一点的电位值是不同的。在分析电路时,电位的参考点只能选取一个。参考点选定后,各点的电位值就确定了。这就是所谓的“电位单值性”。在电工学中,如果所研究的电路里有接地点,通常选择接地点作为电位的参考点,用符号“ $\perp$ ”表示。在电子线路中常取若干导线交汇点或机壳作为电位的参考点,并用符号“ $\perp$ ”表示。

电路中两点之间的电位差称为这两点间的电压,用符号 u 或 U 表示。例如,电路中 A, B 两点之间的电压可写成

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-2)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V),简称伏。为了使用上的方便,常用的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V),它们的关系是

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

$$1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}$$

3. 电动势

电动势是指单位正电荷在电场力作用下,自低电位端经电源内部移到高电

位端时电场力所做的功。电源可以是化学作用而产生的,也可以是电磁感应作用而产生的等,例如电池和发电机。

电动势用符号 e 或 E 表示,其单位也是伏特(V)。

4. 功率

在电路的分析与计算中,还经常用到另外一个物理量——功率。功率是指单位时间内电场力所做的功,用 P 表示。

由物理学的知识我们知道,电场力使电荷 ΔQ 从 A 点移动到 B 点所做的功

$$\Delta w = (V_A - V_B)\Delta Q$$

写成微分的形式有

$$dw = (V_A - V_B)dq$$

而 $i = dQ/dt$, 即 $dq = idt$, 因此

$$dw = (V_A - V_B)idt = U_{AB}idt$$

则电场力在 t_0-t 时段所做的功

$$dw = \int_0^t U_{AB}i dt$$

那么单位时间内电力所做的功即功率为

$$P = \frac{dw}{dt} = U_{AB}i \quad (1-3)$$

当电压的单位是伏特,电流的单位是安培时,功率的单位是瓦特(W),简称瓦。除瓦之外,还有千瓦(kW)或毫瓦(mW),它们之间的关系是

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} = 10^6 \text{ mW}$$

三、电压、电流的关联参考方向

在分析和解决较为复杂的电路问题时,各元件上电流、电压的实际方向在分析和计算之前很难确定。为此,先假定一个参考方向。

1. 电流的参考方向

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。在电路中,某些元件电流的真实方向往往事先无法判明,特别是对于交流电路。由于电流的方向随时间而交替变化,某一瞬时电流的真实方向更无法判明。为此,在分析计算电路问题

时,必须先假定某一元件电流的方向为参考方向(正方向)。

电流的参考方向一般用箭头表示,如图 1-2 所示。显然, $I_1 = -I_2$ 。

电流的参考方向实际上是研究电路的参照系,可以任意假定。当电流的参考方向确定后,如果计算出的电流为正值,说明电流的实际方向与参考方向一致;若计算出的电流为负值,则说明电流的实际方向与参考方向相反。因而,电流是一个代数量,绝对值代表电流的大小,符号表示电流的方向。在没有假定参考方向以前,分析电流的正负是毫无意义的。

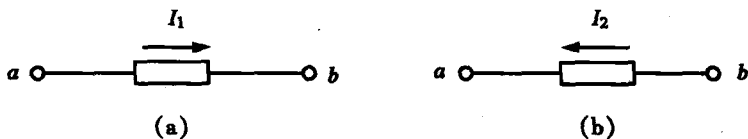


图 1-2 电流的参考方向

2. 电压的参考方向

电路中两点之间电压的方向,是从高电位端指向低电位端的方向,即电位降的方向。在分析电路问题时,我们也要假定电压的参考方向。和电流一样,电压的参考方向是任意假定的。一般电压的参考方向用正(+)、负(-)极性符号表示,有时还用双下标形式表示。如图 1-3 所示。

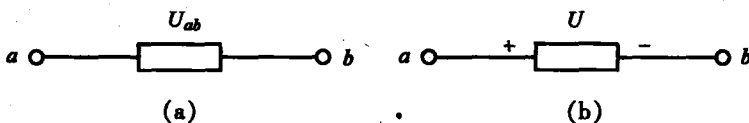


图 1-3 电压的参考方向

图 1-3 中两种表示方法都是指由假定的高电压端(a 端)指向低电位端(b 端)。当电压的参考方向确定后,分析或计算出的电压若为正值,说明电压的实际方向与参考方向相同;若为负值,说明电压的实际方向和参考方向相反。因此,电压也是代数量。

3. 电动势的参考方向

电动势的方向是指电位升高的方向,即从低电位指向高电位的方向,刚好与电压的方向相反。也就是说,对于同一电源,如果按其真实方向表示出电压、电动势的方向,则此时的电压、电动势均为正值。它们反映的是同一客观事实:电源正极电位高于电源负极电位。

作为分析与计算电路的一种方法,同样也可以为电动势假定一个参考方向。

因此,它和电压、电流一样也是代数量,参考方向的表示方法也相同。

4. 电压、电流的关联参考方向

从原则上讲,电压、电流的参考方向都是可以任意假定的,但对于电阻元件来说,电压和电流的实际方向总有一固定关系,即电压是从高电位端指向低电位端;电流是从高电位端流入,从低电位端流出。因此,为了分析、计算的方便,一般情况下,负载元件选取电压的参考方向与电流的参考方向一致,这就是电压、电流的关联参考方向。而电源的电流、电压参考方向常选取不关联的。

元件只有在关联参考方向时,欧姆定律才能表示为 $I = U/R$ 或 $U = IR$,一段电路上的功率才能表示为 $P = UI$ 。当用这些公式计算的功率为正值时,表明该电路是吸收(消耗)电功率的,即将电功率转换为非电功率;反之,该电路是发出(产生)电功率的,即将非电功率转换为电功率。

§ 1-2 电阻元件与欧姆定律

一、电阻元件

导体中的自由电子在作定向移动的过程中,不断地相互碰撞,而且还要和组成导体的原子相碰撞,这种碰撞对电子的运动起阻碍作用,即表现为对电流的阻碍作用,因此我们称之为电阻。电阻用字母“ R ”表示。度量电阻大小的单位是欧姆,简称“欧”,用字母“ Ω ”表示。 $1\ \Omega$ 定义为:当导体两端加有 $1\ \text{V}$ 电压,通过导体的电流为 $1\ \text{A}$ 时,则导体的电阻数值为 $1\ \Omega$ 。即

$$1\ \Omega = \frac{1\ \text{V}}{1\ \text{A}}$$

导体电阻的大小是由导体本身的性质所决定的。例如,对于长直金属导线,导体的电阻 R 与长度 L 成正比,与它的横截面 S 成反比,且与导体金属材料的性质有关,这就是欧姆定律,用公式表示为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-4)$$

式中: R 为导体的电阻, Ω ; L 为导体的长度, m ; S 为导体横截面积, m^2 ; ρ 为导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

导体电阻率的大小,在数值上等于长度为 $1\ \text{m}$,横截面积为 $1\ \text{m}^2$ 的导体所

具有的电阻值。因此,电阻率只与导体材料的性质及温度有关,而和导体的几何尺寸无关。

在相同的温度下,不同的导体具有不同的电阻率,这是由各种导体材料内部结构不同而引起的。即使同一种导体,在不同的外界温度下,它们的电阻率也不同。金属导体的电阻率和温度的关系近似为线性关系。当温度升高时,金属内部分子热运动加强,对电流的阻碍作用加大,电阻率就大。它们的关系可表示为

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (1-5)$$

式中: T 为导体材料的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为参考温度,常取 20°C ; ρ_0 为 T_0 时的电阻率; ρ 为 T 时的电阻率; α 为电阻率的温度系数, $1/^{\circ}\text{C}$ 。对于不同的导体,温度系数 α 不同。

电阻元件的伏安关系可用 $u-i$ 平面上的图形来表示,称为电阻元件的伏安特性曲线。图 1-4(a) 是某电阻元件的伏安特性曲线,这种元件称为非线性电阻元件。如果元件的电流与电压成正比,则其伏安特性曲线是一条通过原点的直线,如图 1-4(b) 所示,则该元件称为线性电阻元件。线性电阻元件的符号可用图 1-4(c) 表示。

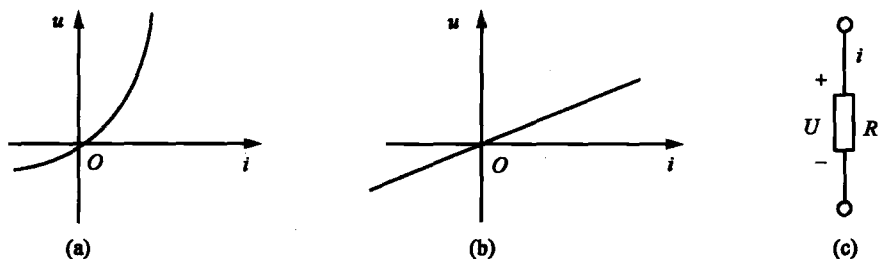


图 1-4 电阻元件的伏安特性曲线

二、欧姆定律

1. 部分电路欧姆定律

在图 1-5 所示电路中,不包含电源,只有负载和导线,称为部分电路。部分电路欧姆定律阐明在一段电路中电压、电流和电阻三者之间关系,即,通过电阻的电流与电阻两端的电压成正比,与电阻成反比。即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-6)$$

式中: I 为电流, A; U 为电压, V; R 为电阻, Ω 。

2. 全电路欧姆定律

图 1-6 是最简单的完全电路, 它由电源 E 、用电器 R 及导线组成。全电路欧姆定律指出电路中流过的电流的大小与电源电动势成正比, 与全部电阻值成反比, 即

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1-7)$$

式中: I 为电流, A; E 为电源电动势, V; R 为外电路电阻, Ω ; r 为内电路电阻, Ω 。

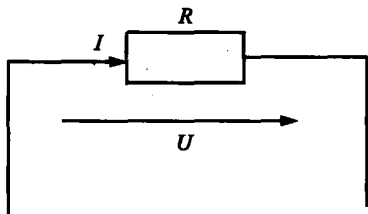


图 1-5 部分电路

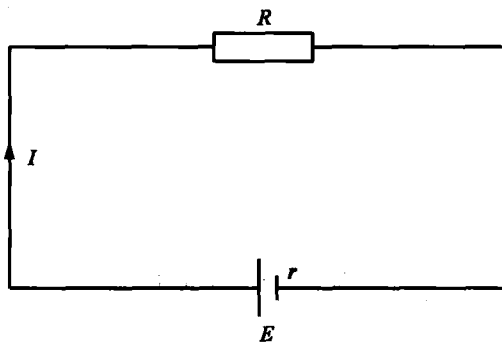


图 1-6 全电路

例 1-1 有一电阻炉, 额定功率为 800 W, 额定电压为 220 V, 求其额定电流及其电阻值。

解: 在电工技术中, 用下标“N”表示额定值。根据 $P = UI = I^2 R$, 可求得额定电流及电阻值分别为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{800}{220} = 3.64(\text{A})$$

$$R = \frac{P_N}{I^2} = \frac{800}{3.64^2} = 60.5(\Omega)$$

§ 1-3 电气设备的额定值和电路的几种状态

一、电气设备的额定值

电气设备(包括电缆、绝缘导线)的导电部分都有一定的电阻。电流流过时,将消耗电能(转变为热能),使电气设备的温度逐渐升高。由于物体的散热量是同它与周围空气的温度差(又叫温升)成正比的,经过一段时间(导线为几分钟,一般电机为1~2 h),散热同发热平衡,温度的升高就稳定下来。电流愈大,发热量也愈大,稳定的温升也就愈高。如果电气设备的温度超过了某一允许的数值,电气设备的绝缘材料便会迅速变脆,寿命缩短,甚至烧毁。因此,根据所用绝缘材料在正常寿命下的允许温升,电气设备都有一个在长期连续运行或规定工作制度下允许通过的最大电流,叫做额定电流,用符号 I_N 表示。

电气设备还根据所用绝缘材料的耐压程度和容许温升等情况,规定正常工作时的电压叫做额定电压,用符号 U_N 表示。

电气设备的额定电压、额定电流和相应的额定功率 P_N 以及其他规定值(例如以后要讲的电动机的额定转速等)叫做电气设备的额定值。额定值表明了电气设备的正常工作条件、状态和容量,通常标在设备的铭牌上,在产品说明书中也可以查到。使用电气设备时一定要注意它的额定值,避免出现不正常的情况和发生事故。

二、电路的几种状态

电路在使用时,可能出现3种状态,现就图1-7所示照明电路说明如下。

1. 空载状态(也叫开路状态)

图1-7电路,当所有电灯开关(S_1, S_2, S_3)都断开时,就处于空载状态。此时,电路中无电流($I=0$),电源不输出功率($P=UI=0$),电源端电压叫做空载电压(也叫开路电压),它与电源电动势相等($U=U_0=E$)。

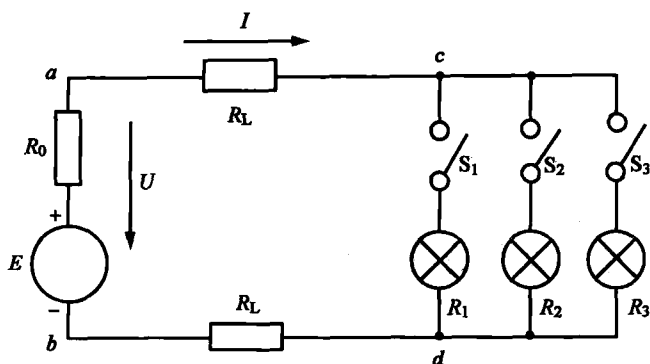


图 1-7 电路的几种状态举例

2. 负载状态

图 1-7 电路中,当有一些电灯开关接通时,就处于负载状态。设照明负载总等效电阻为 R_L ,一根供电线电阻为 R_1 ,电源内阻为 R_0 ,此时,电路中电流为

$$I = \frac{E}{R_L + 2R_1 + R_0}$$

其数值取决于负载电阻 R_L 。一般用电设备都是并联于供电线上,因此,接入的电灯数愈多,负载电阻 R_L 愈小,电路中电流便愈大,负载功率也愈大。在电工技术上把这种情况叫做负载增大。显然,所谓负载的大小指的是负载电流或功率的大小,而不是负载电阻的大小。当电路中电流达到电源或供电线的额定电流时,工作状态叫做“满载”;超过额定电流时叫做“过载”;小于额定电流时叫做“欠载”。如前所述,导线和电气设备的温度升高到稳定值要有一个过程,短时间的少量的过载还是可以的,长时间的过载是不允许的,使用时应当注意。

3. 短路状态

图 1-7 电路中,当 2 根供电线(通常总是并在一起敷设,以减少所生电磁干扰)在某一点由于绝缘损坏而接通时,就处于短路状态。此时,电流不再流过负载而直接经短路接点流回电源,由于在整个回路中只有电源的内阻和部分导线电阻,电流数值很大,叫做短路电流 I_{sc} 。最严重的情况是电源两端的短路(即图 1-7 电路中 a, b 两点接通),短路电流为

$$I_{sc} = \frac{E}{R_0}$$

短路电流远远超过电源和导线的额定电流,如不及时切断,将引起剧烈发热