

煤矿井下实用电气技术 及故障处理

主 编：崔凤录

编写人员：郝中泉 张维正

陈子春 任兰柱



煤炭工业出版社

煤矿井下实用电气技术及故障处理

主 编 崔凤录
编写人员 郝中泉 张维正
 陈子春 任兰柱

煤炭工业出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书由八章组成,主要介绍了煤矿电气作业人员在工作中经常用到的电工基础知识、电工专业知识、数字电子技术基础知识、电气防爆知识、可编程控制器、变频器、矿山供电和综采电气设备故障分析及处理方法等。

本书介绍了作者多年积累的实践经验,内容实用、易学、易懂,是一本贴近煤矿现场实际,值得学习和借鉴的技术书籍。本书可作为职业技术学校学生和煤矿现场实际操作职工的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿井下实用电气技术及故障处理/崔凤录主编. --北京:
煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978-7-5020-4051-2

I. ①煤… II. ①崔… III. ①煤矿-矿用电气设备-故障修复
IV. ①TD68

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 090731 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 18¹/₂ 插页 2
字数 441 千字 印数 1—3 000
2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷
社内编号 6874 定价 39.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

随着煤矿信息化、自动化水平的不断提高和计算机技术的广泛应用，煤矿电气设备的装备水平有了较大提高。电气设备正从机械化向自动化、信息化和智能化发展。为适应煤矿电气技术的发展要求，提高煤矿井下普通电气维修人员的技术素质，推动企业技术水平的全面进步，我们组织生产一线电气技术人员，搜集整理煤矿井下电气新技术、新设备的有关资料，在总结实践工作经验的基础上，编写了这本《煤矿井下实用电气技术及故障处理》。

本书着眼于解决煤矿电气设备使用和维护中遇到的实际问题，注重电气基础知识、专业技术知识及现场工作经验的讲解，力求内容全面新颖、图文并茂、深入浅出、通俗易懂，具有实用性，并总结了实际工作中大量常见电气故障的实用诊断与处理方法。

本书在编写过程中，引用了大量的文献资料，在此对文献资料的作者表示衷心的感谢。由于编者水平和精力所限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 4 月

目 次

第一章 电工基础知识	1
第一节 电荷和电场	1
第二节 电流、电压和电动势	4
第三节 电阻和欧姆定律	6
第四节 电感与电容	10
第五节 直流电路	20
第六节 交流电路	23
第二章 电工专业知识	33
第一节 常用电工仪表	33
第二节 变压器	40
第三节 电动机	62
第四节 矿用电缆	78
第三章 数字电子技术基础知识	89
第一节 半导体器件的基础知识	89
第二节 门电路	97
第三节 触发器	102
第四节 放大电路、负反馈、单相整流电路、稳压电路	110
第五节 集成运算放大器、晶闸管及触发电路	128
第四章 可编程控制器	140
第一节 可编程控制器概述	140
第二节 可编程控制器分类和结构	144
第三节 可编程控制器的工作原理及主要技术指标	151
第四节 可编程控制系统安装及发展趋势	154
第五章 变频器	157
第一节 三相异步电动机调速方式及变频调速原理简介	157
第二节 变频器分类、特点、结构及基本工作原理	159
第三节 变频器技术指标、参数设置和选型、安装及应用前景	163

第六章 电气防爆知识.....	167
第一节 电气防爆设备.....	167
第二节 井下电气设备.....	175
第三节 失爆现象.....	180
第七章 矿山供电.....	183
第一节 矿井供电系统.....	183
第二节 井下供电安全.....	204
第三节 矿井供电电网保护.....	217
第八章 综采电气设备故障分析及处理方法.....	251
第一节 井下低压电气故障的起因及排除方法.....	251
第二节 如何看懂井下电气原理图.....	262
第三节 操作线路故障的查找方法.....	272
第四节 矿用低压电气设备故障分析及处理方法.....	277
参考文献.....	290

第一章 电工基础知识

第一节 电荷和电场

一、电荷

在我们周围存在着各种物质，每一种物质都是由一种特定的分子组成的，分子是保持物质原有性质不变的最小颗粒。

尽管分子的颗粒很小，但它还可分解为更小的微粒——原子，只是分子经过分解以后失去了它原有的特性。

每个原子都包含着一个处于中心的原子核和在核外面沿一定的轨道围绕原子核作高速旋转运动的若干个电子。原子核在原子的中心，带正电荷，用“+”号来表示；环绕原子核旋转的电子带负电荷，用“-”号来表示。无论原子结构是简单还是复杂，原子核所带正电量和核外全部电子所带的负电量总是相等的。

原子核和电子是靠正、负电荷之间的吸引力使电子绕核旋转。带正电荷的原子核与带负电荷的电子间有电的吸引力作用，使电子围绕原子核旋转而不飞逸出去。

然而对于那些靠近原子核内层轨道上的电子，与原子核之间的吸引力比较强，不容易脱离原子核。但是，最外层轨道上的电子，受原子核的吸引力比较弱，所以很容易摆脱原子核的束缚，跑到轨道外面成为“自由电子”。

任何物质在正常情况下是中性的，当原子失去了最外层轨道上的电子后，它的电性中和就被破坏了，原子就变成带正电荷的正离子。飞出轨道的电子可能被另外的原子所吸引，吸收了电子的原子就成了带负电荷的负离子。综上所述，电主要有以下特点：

- (1) 物质的原子得、失电子时就会带电。
- (2) 电有两种，即正电，用“+”号表示；负电，用“-”号表示。
- (3) 电荷之间的关系是同性相斥、异性相吸。

电荷是带电的物质基本微粒，电子是它的最小单元。电荷是客观存在的一种物质，既不能创造，也不会消失。在它周围还同时客观地存在着一个能体现出电性能（电作用）的空间范围，这个空间范围称为电场。

二、电位与电位差（电压）

1. 电位

电位是从能量的角度来描述电场的物理量，带电体周围存在着电场，电荷在电场中受到电场力的作用，因此电荷在电场中移动就需要做功。如果将一个单位正电荷从电场强度为零的无限远处移到正电场某一点，外力必须克服电场力做功。我们将单位正电荷

从无限远处移到电场内某一点，外力克服电场力所做的功叫做该点的电位。电场中每一点都有一个确定的电位值。所谓电位，就是单位正电荷在电场中某一点所具有的电位能（势能），用 U 表示。

在图 1-1 中，外力把单位正电荷从电场外移到电场内 a 点，外力克服电场力所做的功为 W ，如果电荷的电量为 q ，则点 a 的电位为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-1)$$

实验证明，电位仅与电场本身的性质有关，而与该点放不放“点电荷”无关，与电荷所带电量的大小无关，因为电量增大多少倍，外力所做的功也增加同样的倍数，故电位只与位置有关。电位高低是对参考点而言的，不指定参考点谈论电位是没有意义的。凡电路中电位相同的点均称为等电位点。应当注意，一个电路里只能有一个参考点。

在实际应用中，我们常引入零电位的概念。零电位实际上是一个基准，确定零电位之后，才能计算其他各点的电位。

由此可见，无论选电场中哪点为零电位，电场中任意两点之间的电压是不变的。

实际上，所说某一点的电位，是指该点相对于电位参考零点（即零电位点）而言的电位差。可见，某点电位的高低，与零电位点的选择密切相关，所以说电位是相对的。若零电位点选择不同，则电路中某点的电位可能是正电位，也可能是负电位。电位参考零点原则上可以任意选定，但当产生电场的电荷只是分布在有限大的区域里时，理论上应取无穷远点作为零电位点。为了方便起见，通常是选择大地的电位作为零电位点。电气上常说的接“地”，实际上就是指的接“零电位点”。

2. 电位差（电压）

一般规定，电荷在电场力作用下移动时，电场力所做的功为正值，电荷在外力作用下，反抗电场力移动时，电场力所做的功为负值，实际上是外力做功。电场力做正功，电荷位能减少，电场力做负功，电荷位能增加。在上面的例子中，外力将正电荷从无限远处移到 a 点，电场力做负功，单位正电荷位能增加为 U_a 。

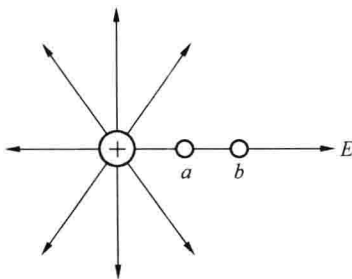


图 1-1 电场中某点的电位

在实际中，经常用到的不是电场中某点的电位，而是某一点与另一点之间的电位差，就是我们平时说的电压。如在图 1-1 中，要使正电荷 q 从 b 点移到 a 点，就得用外力克服电场力所做的功就是正电荷 q 增加的位能，即

$$W = q(U_a - U_b) \quad (1-2)$$

式中， $U_a - U_b$ 叫做 a 、 b 两点间的电位差，也称做 a 、 b 两点间的电压，用 U_{ab} 表示。式 (1-2) 也可写成：

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

在实用单位中，功与能量的单位用焦耳（J），电压与电位的单位用焦耳/库仑（J/C），也叫伏特（V），因此：

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

常用的电压单位是伏特（简称伏），较大单位是千伏（kV）， $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$ ，较小的单

位是毫伏 (mV) 和微伏 (μV), $1\text{ mV} = 10^{-3}\text{ V}$, $1\text{ }\mu\text{V} = 10^{-6}\text{ V}$ 。

三、电场力和电场强度

1. 电场力

两个带电体之间存在着力的作用, 这个力叫电场力。电场力的大小不仅和带电体所带的电量有关, 而且还和它们的形状、大小及周围的介质有关, 情况比较复杂。当两个带电体之间的距离比带电体的大小大得多的情况下, 我们可以把带电体看做是点电荷, 点电荷之间的作用力可以用库仑定律求出:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} \quad (1-4)$$

式中 F ——两个点电荷之间的作用力, N;

q_1 、 q_2 ——两个点电荷的电量, C;

r ——两点电荷之间的距离, m;

ϵ ——介电系数, 它与电介质的性质有关。

库仑定律表明, 在均匀介质中, 两个点电荷的相互作用力和它们电荷量的乘积成正比, 和距离平方成反比。

在真空中, 介电系数用 ϵ_0 表示, 它是一个常数, 可表示为 $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12}$ 法/米 (F/m)。

在实际常引入相对介电系数的概念, 它是某一电介质的介电系数与真空中的介电系数 ϵ_0 的比值, 用 ϵ_r 表示, 即

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

由于真空中的介电系数最小, 所以 ϵ_r 总是大于 1, 引入相对介电系数后, 库仑定律便可写成下列形式:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r^2} \quad (1-5)$$

相对介电系数没有单位。空气中的介电系数和真空中的介电系数值接近, 所以空气的相对介电系数等于 1, 其他电介质的相对介电系数都大于 1。

2. 电场强度

电荷周围存在着电场。静止电荷产生的电场不随时间变化, 我们称为静电场。

电场的大小和方向可以用电力线来表示。电力线都是从正电荷出发, 终止于负电荷, 电力线必须垂直于带电体表面, 并且任何两条电力线都不相交。电力线箭头所指的方向, 代表该点正电荷受力的方向, 电力线的疏密程度, 表示电场的强弱。必须指出, 实际上电力线并不存在, 只是人们用来形象描述电场的一种方法。

为了定量地描述电场, 引入了电场强度的概念。电场强度是用来表示电场中各点场的强弱和方向的一个物理量。在静电场中的某一确定点, 试验单位正电荷在电场中的某一点所受力的方向, 叫该点的电场强度, 用符号 E 来表示, 单位为牛顿/库仑 (N/C)。即

$$E = \frac{F}{q}$$

式中 F ——电场力;
 q ——试验电荷。

一般来说, 电场中各点的电场强度是不一样的, 离带电体越远, 电场强度越弱。

上式说明, 电场中任一点的电场强度, 在数值上等于单位正电荷所受的电场力的大小; 电场强度的方向就是正电荷受力的方向。在实用单位中, 电场强度的单位用伏特/米 (V/m) 来表示:

$$1 \text{ V/m} = \frac{1 \text{ J/m}}{1 \text{ C}} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ C}}$$

第二节 电流、电压和电动势

一、电流

在电场力的作用下, 自由电子或离子所产生的有规则的运动称为电流。通常用电流强度这一物理量表示电流的强弱, 所谓电流强度, 是指在电场力的作用下, 单位时间内通过某一导体截面的电量, 常简称为电流。人们习惯上规定正电荷运动的方向 (或负电荷运动的相反方向) 为电流的方向。

如果电流强度不随时间而变化, 则称这种电流为直流电流, 简称直流, 直流电流用字母 I 表示, 其表达式为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-6)$$

式中 I ——电流, A;

Q ——电量, C;

t ——时间, s。

电流的单位是安培 (A), 简称安。即在 1 秒 (s) 内通过导体截面的电量为 1 库仑 (C) 时, 则电流就是 1 安培 (A)。

常用的电流单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA)。它们之间的换算关系是

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

对于交流电来说, 电流的大小和方向都是随时间而变化的。为了定义电流强度, 我们用 dt 表示极短的一段时间, dQ 表示在 dt 时间内通过导体的电荷量, i 表示交流电流, 则

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1-7)$$

产生电流的条件: 一是电路中必须存在不为零的电动势, 即电路两端要存在一定的电压; 二是电路必须成为闭合回路。

二、电压

电压是衡量电场力做功能力大小的一个物理量。如图 1-2 所示, 设在电场力 F 的作用下, 正电荷 Q 由 A 移到 B , 移动距离为 L_{AB} , 则电场力所做的功为

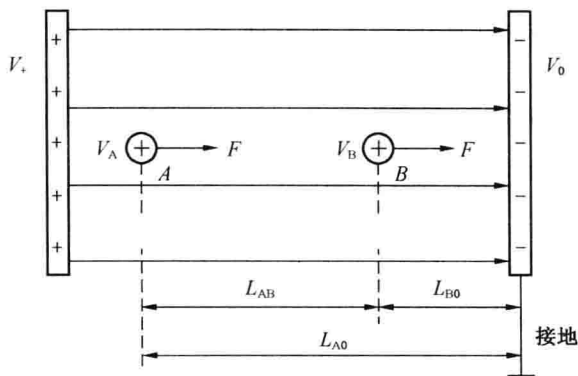


图 1-2 电荷在均匀电场中的电位

$$W_{AB} = FL_{AB}$$

电场力把单位正电荷从电场中 A 点移到 B 点所做的功，称为该两点间的电压，用 U_{AB} 表示，即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (1-8)$$

电压的单位是伏特 (V)。若电场力将 1 库仑 (C) 的电荷从 A 点移到 B 点所做的功为 1 焦耳 (J)，则 A 、 B 两点之间的电压就是 1 伏特 (V)。

常用的电压单位还有千伏 (kV)，毫伏 (mV) 和微伏 (μV)。它们之间的换算关系是

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

电压和电流一样，不但有大小而且有方向，其方向由高电位到低电位即电位降低的方向。显然，它与零电位点的选择没有关系。因此，电压大小是绝对的。因为不管零电位点如何选择，电压始终是某两点之间的电位差。可见，电压和电位是有区别的，电路中某两点间电压的大小是绝对的，与参考点无关；而某点电位的大小则是相对的，随参考点而变。

如果选定电路中某一点为参考点，则电路中其他各点与参考点之间的电压就有一个确定的电压值 (U_{A0} 、 U_{B0})，这些电压值称为以 0 为参考点的各点电位，用符号 V 表示，如图 1-2 所示。在电场中任意两点间的电压称为两点间的电位差，即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-9)$$

电位的单位与电压的单位相同。

三、电动势

电动势是衡量电源将非电能转换成电能本领的物理量。在电源内部，外力将单位正电荷从电源负极移到电源正极所做的功，称为电源的电动势，用 E 表示，即

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-10)$$

电动势的单位也是伏特。若外力将 1 库仑电量从电源的负极移到正极所做的功是 1

焦，则电源的电动势等于 1 V。电动势的单位也与电位的单位相同。

电动势的方向规定为在电源内部由负极指向正极。因此，电动势的方向与电压的方向相反，这是两者的区别。

在数值关系上，电动势等于电源内部电压降与负载两端的电压降之和，即

$$E = Ir + IR \quad (1-11)$$

如忽略电源内部的电压降 Ir ，则电动势就等于负载两端电压降，即

$$E = IR \quad (1-12)$$

当外电路（即负载）开路时，则电动势就等于电路的开路电压。

电压和电动势两者在量值上的关系：当电路没有构成闭合回路（即电路内没有电流）的情况下，电源的电动势就等于极间外部电路的端电压。当电路闭合电路中存在电流时，该电流在电源内部电路上将会产生电压降落（简称电压降或压降）。这时，电源电动势等于外部电路电压降与该内部电路压降之和。

第三节 电阻和欧姆定律

一、电阻

导体对电流的阻碍作用称为电阻，导体的电阻是客观存在的物理量，即使没有电流，导体仍存在着电阻。电阻用符号 R 表示，单位为欧姆（ Ω ），简称欧。如果导体的两端电压为 1 V，通过的电流为 1 A，则该导体的电阻为 1 Ω ，即

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} \quad (1-13)$$

电阻常用的单位还有千欧（ $\text{k}\Omega$ ）和兆欧（ $\text{M}\Omega$ ），其换算关系为

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

对匀质导体，温度一定时，导体的电阻与导体截面积成反比，与导体长度成正比，并且还导体的材料有关。用公式表示为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-14)$$

式中 L ——导体的长度，m；

S ——导体截面积， m^2 ；

ρ ——比例常数，叫做电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

电阻率 ρ 是表征不同材料导电能力的参数。材料的电阻率越小，导电能力越好。导电材料的电阻率不仅和材料本身特性及尺寸有关，而且还受温度的影响。大部分金属导体的电阻值随温度升高而增大，但碳和一些合金材料的电阻值却随温度升高而减小。

实践证明，导体的电阻还与导体的温度有关。一般金属材料的电阻是随温度的升高而增大，但不同的材料，当温度升高时，电阻的变化程度也不同。一般采用电阻温度系数反映电阻对温度变化的情况。电阻温度系数用 α 表示，单位是 $1/^\circ\text{C}$ 。若温度为 t_1 时，导体的电阻为 R_1 ；温度为 t_2 时，导体的电阻为 R_2 ，则电阻温度系数为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \quad (1-15)$$

二、电阻的串联、并联和混联电路

1. 电阻的串联

两个或两个以上电阻依次相连，中间无分支的连接方式称为电阻的串联。为了讲解方便，我们以图 1-3a 所示的两个电阻串联电路为例进行讲述，多电阻串联与此相同，这里不再赘述。

电阻串联的特点：

- (1) 串联电路中流过每个电阻的电流相等。
- (2) 总电压等于各电阻上电压之和，即 $U = U_1 + U_2$ 。
- (3) 等效电阻 R 等于各电阻之和，即 $R = R_1 + R_2$ 。

于是可以把电路等效成如图 1-3b 所示的电路。

各电阻上的电压分别为

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U \quad (1-16)$$

$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (1-17)$$

式 (1-16) 和式 (1-17) 是两个电阻的分压公式， $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 和 $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 叫分压系数。

可见，在串联电路中，串联的总电阻比任何一个串联电阻的阻值大。串联各电阻上的电压与相应的电阻成正比，即阻值越大的电阻所分配到的电压越大；反之，电压越小。

在实际工作中，电阻串联有以下应用：

- (1) 串联电阻可以获得阻值较大的电阻，实现限流。
- (2) 负载需要的电压低于电源电压时，可用串联电阻的方法将负载接到电路中，实现降压。
- (3) 在电工测量中，应用串联电阻的方法来扩大电压表的量程。

2. 电阻的并联

两个或两个以上电阻接在电路中相同的两点之间的连接方式，称为电阻的并联电路，图 1-4a 所示为两个电阻并联电路。

电阻并联的特点：

- (1) 并联电路各电阻两端的电压相等且等于电路两端电压。
- (2) 总电流等于各并联电阻中电流之和，即 $I = I_1 + I_2$ 。
- (3) 并联电路中的等效电阻（即总电阻）等于各并联电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 还可以写成：

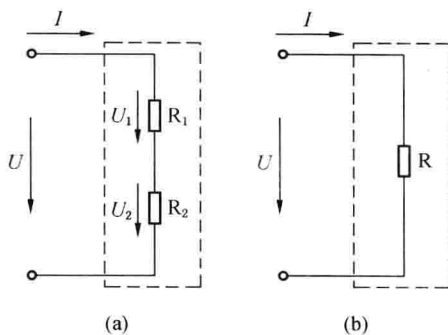


图 1-3 电阻串联电路

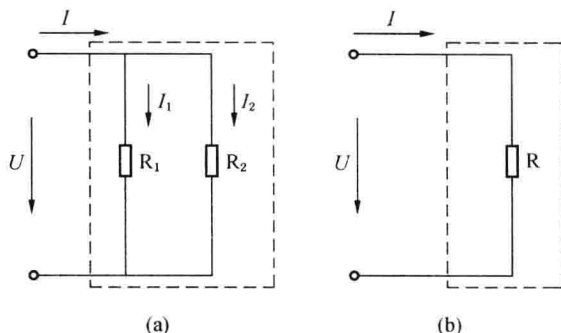


图 1-4 电阻并联电路

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1-19)$$

于是，可以把电路等效成如图 1-4b 所示的电路。

则两并联电阻上的电流分别为

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{IR}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (1-20)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{IR}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (1-21)$$

式 (1-20) 和式 (1-21) 称为两个电阻的分流公式， $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 和 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 称为分流系数。

可见，在并联电路中，并联的总电阻比任何一个并联电阻的阻值都小，并联各电阻上的电流与相应的电阻成反比，即阻值越大的电阻所分配到的电流越小；反之，电流越大。

在实际工作中，电阻并联有以下应用：

- (1) 接于同一工作电压的负载是并联连接。
- (2) 并联电阻可获得阻值较小的电阻。
- (3) 在电工测量中，应用并联电阻的方法来扩大电流表的量程。

3. 电阻的混联

电路中既有电阻串联又有电阻并联，这种连接方式称为电阻的混联。混联电路的串联关系具有串联电路的特点，并联关系具有并联电路的特点。混联电路的计算方法是，先根据串联或并联电路的特点，将电路进一步简化，最后得到一个无分支的电路。

电阻无论串联或并联，电路中消耗的总功率是各个电阻器消耗功率之和。如果不同阻值的电阻串、并联时，必须注意每只电阻的额定功率一定要符合电路对每只电阻所要求的功率值。

在串联电路里，因流经各个电阻的电流相同，电阻越大，其分压也越大，因而其消耗的功率也就越大；在并联电路里，因各个电阻上的电压相同，电阻越小，所通过的电流就越大，其阻值小的电阻所耗散的功率反而大，因为功率与电流平方成正比。

三、欧姆定律

1. 部分电路欧姆定律

在一段电路中不含电动势，只有电阻，如图 1-5 所示，这段电路中，在电阻中流过的电流与加在电阻两端的电压成正比，与电阻的大小成反比，即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-22)$$

式中，电压的单位用伏特（V），电阻的单位用欧姆（ Ω ），则电流的单位是安培（A）。

电阻的倒数称为电导，引入电导 G 后，欧姆定律还可以写成：

$$I = GU$$

欧姆定律公式表达了电路中电压、电流和电阻的关系，它说明：

(1) 如果保持电阻不变，当电压增大时，电流也将成比例地增加；电压减小时，电流也将成比例地减小。

(2) 如果维持电压不变，当电阻增大时，电流与电阻成反比例地减小，即电阻增大一倍，电流减至原来的 1/2；当电阻减小时，电流成反比例地增加。

严格地讲，线性电阻是不存在的。例如，导体通过电流会发热，引起温度变化，而温度变化又会使电阻的阻值发生改变。在一般情况下，导体电阻的变化值很小，可以近似当做线性元件来考虑。

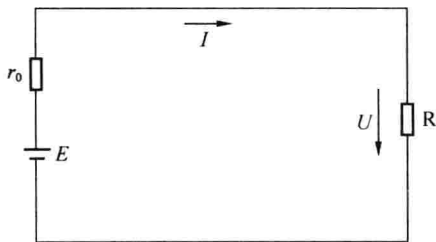


图 1-6 含电源的闭合电路

2. 全电路欧姆定律

全电路是含有电源的闭合电路，如图 1-6 所示。图中 E 为电源电动势， r_0 为电源的内阻， R 为负载电阻。

全电路欧姆定律的内容是，全电路中的电流强度与电源的电动势成正比，与整个电路中（即内电路和外电路）的电阻成反比，其数学式为

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-23)$$

式中 I ——电路中的电流，A；

E ——电源电动势，V；

R ——外电路电阻， Ω ；

r_0 ——内电路电阻， Ω 。

全电路中的电压与电流的变化规律表现为如下几个方面：

(1) 电路处于通路状态时，当负载电阻减小时，电路中电流增大，电源端电压 $U = E - Ir_0$ 将略有下降。

(2) 电路处于断路状态时，如图 1-7 所示，电路的特征可用下列各式表示：

$$\left. \begin{aligned} R &\rightarrow \infty \\ I &= 0 \\ U &= E \\ P_E &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

即外电路电阻对电源来说等于无限大，电路中电流为零，电源端电压等于电源电动势，电源不输出电能。

(3) 短路状态时（电源的两端 a 和 b 由于某种原因连在一起），如图 1-8 所示，电路的特征可用下列各式表示：

$$\left. \begin{aligned} R &\rightarrow \infty \\ I_d &= \frac{E}{r_0} \\ E &= I_d r_0 \\ P_E &= I_d^2 r_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

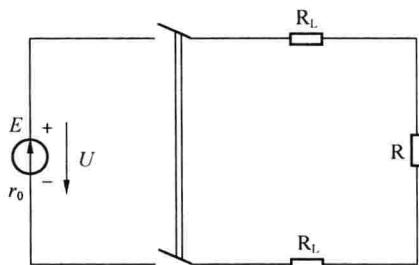


图 1-7 空载

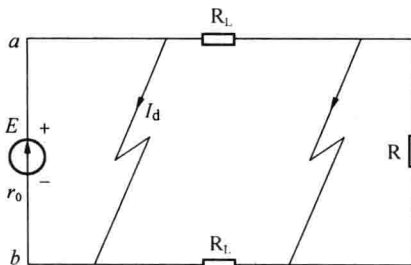


图 1-8 短路

电源短路时，外电路电阻可视为零，电流不再流过负载，回路中仅含电源内阻，这时电流很大称为短路电流。短路电流可使电源遭受电磁力的冲击与热的损伤而损坏。电源所产生的能量全被内阻所消耗。

欧姆定律揭示了电流、电压、电阻三者之间的联系，是电路分析的基本定律之一，应用十分广泛。

第四节 电感与电容

一、电感

1. 磁的性质

把物体能够吸引铁、钴、镍等金属及其合金的性质称为磁性，具有磁性的物体称为磁体。能够长久保持磁性的磁铁叫做永久磁铁。永久磁铁有天然的和人造的两种。天然磁铁磁性很弱，工业中不适用，人造磁铁由钢和铁经过磁化制成。

2. 磁场

任何磁体都有两个磁极，并且不论磁体如何分割，总保持两个磁极。一个叫北极，用字母 N 表示；一个叫南极，用字母 S 表示。磁极是磁性最强的地方。两个磁体间相互

作用的规律是同性相斥，异性相吸，磁极之间的这种相互作用力称为磁力。

磁体周围的空間中存在着一種特殊的物質稱為磁場。兩磁體磁極之間的相互作用力就是通過磁場來傳遞的。圖1-9所示為條形磁鐵對指南針的吸引情況。磁鐵對指南針有吸引作用，表明磁鐵具有磁力。為了描述磁場的特性，工程上常採用假想的磁力線進行描述。

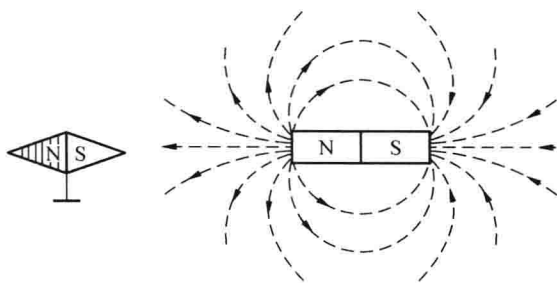


圖 1-9 條形磁鐵對指南針的吸引情況

磁力線具有如下特性：

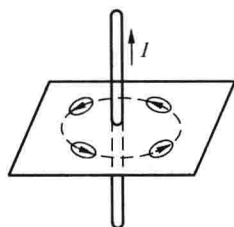
- (1) 磁力線是互不交叉的閉合曲線，在磁體外部由 N 極指向 S 極，在磁體內部由 S 極指向 N 極。
- (2) 磁力線上任意一點切線方向，就是該點的磁場方向（即 N 極的指向）。
- (3) 磁力線越密磁場越強，磁力線越疏磁場越弱。磁力線均勻分布而又相互平行的區域稱為均勻磁場，反之稱為非均勻磁場。

3. 電流的磁場

實驗表明，通電導體周圍存在着磁場，即電流產生磁場，這種現象稱為電流的磁效應。磁場是物質的一種特殊形態。磁場有兩種表現形式：一是磁場對處在磁場內的載流導體或鐵磁物質有力的作用，在與磁場做相對運動的導體上能產生感應電動勢；二是磁場具有能量。通電導體（或線圈）周圍產生磁場的方向，可用安培定律（又稱右手螺旋定則）來判斷。

1) 直線電流產生的磁場

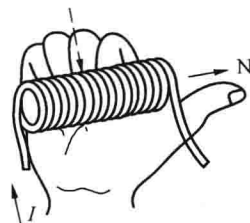
載流導體周圍的磁場方向與產生該磁場電流方向的关系可用右手螺旋定則來確定：用右手握住直線導體，拇指的指向表示電流方向，彎曲四指的指向即為磁場方向，如圖 1-10a、圖 1-10b 所示。



(a) 電流磁場方向



(b) 載流導體磁力線方向



(c) 螺旋線圈磁力線方向

圖 1-10 磁場及其方向的判定

2) 環形電流產生的磁場

對於通電螺旋線圈周圍的磁場，磁場方向也用右手螺旋定則判斷。用右手握住螺旋