



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

输配电线路电气基础

王清葵 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

输配电线路电气基础

主编 王清葵
编写 张 辉 金育明 肖世友
主审 顾学珍



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。全书共分六章，主要包括电工基础知识，变配电设备的一次部分，变配电设备的二次部分，电厂、电力网及电力系统，电力网电气计算知识，线路过电压及保护。本书着重讲述输配电线路的基本概念和基本理论，以及线路专业工人应具备的电力网、电力系统的知识，避免复杂计算，适用于线路专业六个工种和非电专业技术人员的学习及使用，具有针对性强，适应性广的特点。

本书可作为职业技术学院输配电线路运行与检修专业的教学用书，也可作为电力行业的培训教材，还可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

输配电线路电气基础/王清葵主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-6247-2

I. 输... II. 王... III. 输配电线路—电气工程—职业教育—教材 IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 174672 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 327 千字
定价 21.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

· 版权专有 翻印必究

前 言

本人大学毕业于文化大革命前夕，在特定的历史条件下，较长时间和线路工人同吃、同住、同劳动，以后又终身从事输配电线路职业教育，一直在思考线路专业性质、工人究竟应该掌握多少电气知识。

输配电线路专业是力、电并重的专业。其中，应用的力学知识十分广泛，除常规的理论、材料力学外，还涉及结构力学、钢筋混凝土力学和土力学等知识；作为电力系统员工，除了应熟悉常规的电工基础知识外，还必须熟悉电力系统组成，变配电所一、二次设备，电力网功率、电压损失，电压调整方法和电力网过电压知识。线路工人是电力系统、电力网中的主要成员，应该“立足岗位，胸怀系统”，在属于线路工人的六个工种的等级工技术要求中，都要求工人“了解电力系统生产过程”。本书就是在此思想基础上，并在线路工人中做了大量调查研究工作，而编写完成的。

本书由苏州电力培训中心王清葵高级讲师担任主编，由苏州电力培训中心肖世友、吴江市供电公司电力营销部张辉主任和吴江市送变电工程公司金育明经理参编，本书由顾学珍高级工程师担任主审，在审阅过程中提出了许多意见，在此表示感谢。

本书力求避免复杂计算，通俗易懂，涵盖输配电专业方面电气知识，能为广大工人师傅所接受。

本书尚有许多不妥和错误之处，恳请读者指正。

王清葵

2007年12月

目 录

前言

第一章 电工基础知识	1
第一节 直流电路.....	1
第二节 电磁和电磁感应.....	10
第三节 交流电路.....	18
第四节 三相交流电路.....	30
第二章 变配电设备的一次部分	35
第一节 变压器和互感器.....	35
第二节 异步电动机.....	48
第三节 常用小型发电机.....	61
第四节 开关电器.....	70
第五节 绝缘子、母线、避雷器和电缆.....	83
第三章 变配电设备的二次部分	92
第一节 电工仪表及其测量.....	92
第二节 控制电路.....	109
第三节 保护、监视和自动控制电路简单介绍.....	116
第四章 电厂、电力网及电力系统	120
第一节 发电厂.....	120
第二节 电力网.....	129
第三节 电力系统.....	135
第四节 电力系统中性点接地方式.....	139
第五节 输电线路技术的发展.....	144
第五章 电力网电气计算知识	150
第一节 电力网的参数和等值电路.....	150
第二节 架空输电线路中电压损耗与功率损耗.....	153
第三节 电力网潮流分布计算基本知识和电力系统的电压调整方法.....	155
第四节 电力网线损率和电能损耗计算.....	161
第五节 降低线损措施.....	164
第六节 导线截面选择方法.....	168

第六章 线路过电压及保护	179
第一节 雷电过电压	179
第二节 电力系统内部过电压	183
第三节 过电压保护设备	190
第四节 输配电线路防雷保护	195
第五节 电气装置接地与接地装置	204

电工基础知识

第一节 直流电路

电路就是电流通过的路径，它由电源、负载、连接导线和开关等组成。如图 1-1 所示为最简单的电路。负载、连接导线和开关称为外电路，电源内部的一段电路称为内电路。

电源：电源是一种将非电能转换成电能的装置。

负载：负载是取用电能的装置，也就是用电设备。

连接部分：是用来连接电源与负载，构成电流通路的中间环节，是用来输送、分配和控制电能的。

当开关闭合时，电路中有电流通过，负载就可以工作，叫做接通电路；当开关断开时，电路中没有电流通过，负载停止工作，叫做断开电路，即分闸。

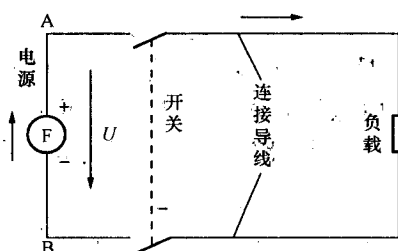


图 1-1 最简单的电路

一、电路的几个基本物理量

1. 电量

电量是指物体所带电荷的多少，用符号 Q 表示。电量的单位是 C (库仑)， $1 \text{ 库} = 6.24 \times 10^{13}$ 个电子电荷。当电荷积聚不动时，这种电荷称为静电。当电荷处在运动状态时，称为动电。

2. 电流

导体中的自由电子在电场力的作用下作有规则的定向运动，就形成了电流。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的方向。因此，在金属导体中，电流的方向是和自由电子的实际移动方向相反的。

3. 电流强度

电流的大小用电流强度 (简称电流) 来表示，其数值等于单位时间内通过导体截面的电荷量，通常用符号 I 表示，即

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

式中 I ——电流强度， A ；

Q ——通过导体截面的电荷量， C ；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间， s 。

电流强度的单位可用 kA (千安)、 A (安)、 mA (毫安)、 μA (微安) 表示，即

$$1kA = 10^3 A; 1A = 10^3 mA; 1mA = 10^3 \mu A,$$

直流电流的大小和方向都不随时间变化，用大写字母 I 表示。

4. 电位和电压

(1) 电位：电场中某点 A 的电位等于单位正电荷在该点所具有的电位能，用符号 U_A

表示。一般规定参考点的电位为零。所以计算电路中某点的电位就是求该点与参考点之间的电位差。选择不同的参考点, 电路中各点电位的大小和正负也就不同, 而参考点一旦选定, 各点的电位也就确定了。如图 1-2 所示, 电池的正极电位比负极高 6V, 所以图中的 B 点为参考点, 则 $U_B = 0V$, $U_A = +6V$ 。如以图中的 A 点为参考点, 则 $U_A = 0V$, $U_B = -6V$ 。

(2) 电压 (电位差): 电路中任意两点间电位的差值称为电压 (电位差)。电路中两点的电压与参考点的选择无关, 如图 1-2 所示。如 B 是参考点, $U_{AB} = U_A - U_B = +6V - 0V = +6V$; 如 A 是参考点, $U_{AB} = U_A - U_B = 0V - (-6V) = +6V$ 。两种结果是一样的。

电压的正方向规定为从高电位指向低电位, 如图 1-3 所示, 电源电压的正方向由 A 指向 B。在外电路上, 负载两端电压的正方向与流过该负载的电流方向是一致的。

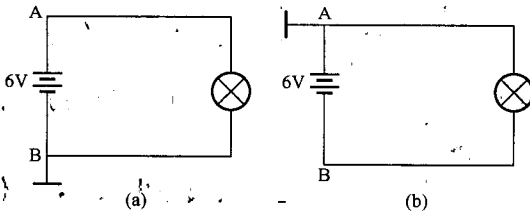


图 1-2 电路中两点的电压与选择的参考点有关

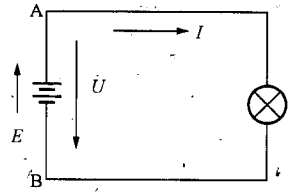


图 1-3 电压的正方向

5. 电动势

电源的非静电力把单位正电荷从负极移送到正极时所做的功叫做电源的电动势, 用符号 E 表示。电动势的正方向规定为从电源的负极指向正极, 如图 1-3 所示。电位、电压、电动势的单位均用伏特 (V) 表示。根据不同的需要, 也用 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏) 为单位。

$$1kV = 1000V; 1V = 1000mV; 1mA = 1000\mu V$$

6. 电阻

导体对电流起阻碍作用的能力称为电阻, 用符号 R 表示, 电阻的大小取决于材料的物质结构。电阻的单位是 Ω (欧姆)。当电压为 1V、电流为 1A 时, 导体的电阻即为 1Ω , 高电阻的单位常用 $k\Omega$ (千欧) 和 $M\Omega$ (兆欧) 表示。

$$1k\Omega = 1000\Omega; 1M\Omega = 10^6\Omega$$

导体的电阻不仅与导体的材料有关, 而且与导体的几何尺寸有关, 一般导体的电阻可由电阻定律求得, 即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中 R ——导体的电阻, Ω ;

l ——导体的长度, m;

S ——导体的截面积, mm^2 ;

ρ ——导体的电阻率, $\Omega \cdot mm^2/m$ 。

电阻率 ρ 是长 1m、截面为 $1mm^2$ 导体的电阻值。如铜的电阻率 $\rho = 0.0175\Omega \cdot mm^2/m$, 就是指一根长 1m、截面为 $1mm^2$ 的铜线的电阻值为 0.0175Ω 。同一种导电材料的电阻大小还和温度有关, 金属导体的电阻值随温度的升高而增大, 但碳和半导体材料的电阻值却随温

度的上升而减小，表 1-1 列出了几种常用材料在 20℃ 时的电阻率。

表 1-1 常用金属材料在 20℃ 时的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

材料	银	铜	铝	钨	黄铜	康铜	锰铜	镍铬合金	铂
ρ	0.016	0.0175	0.029	0.055	0.065	0.43	0.50	1.1	0.106

二、欧姆定律

1. 部分电路的欧姆定律

如图 1-4 表示的一段无源支路，图中 R 是部分电路的电阻。实践证明，对于一段通电电路，流过其中的电流与这段电路两端的电压成正比，而与这段电路的电阻成反比，这个关系叫做欧姆定律，用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-3)$$

式中 I ——电流，A；

U ——电压，V；

R ——电阻， Ω 。

部分电路的欧姆定律，反应了部分电路中电压、电流和电阻的相互关系，它是分析和计算部分电路的主要依据。

2. 全电路的欧姆定律

如图 1-5 所示是具有一个电动势的全电路。图中 r_0 是电源的内阻；当连接导线的电阻可以忽略不计时，负载电阻 R 就是外电路的电阻。当开关 S 接通时，电路中将有电流流通。下面讨论电流、电动势与电阻间的关系。根据部分电路欧姆定律，在外电路负载电阻 R 上的电阻压降为 $U = IR$ ，在内电路中电源内阻 r_0 的电阻压降为 $U_0 = Ir_0$ 。

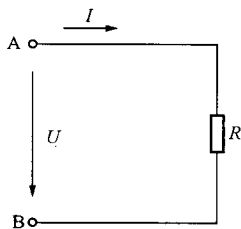


图 1-4 一段无源支路

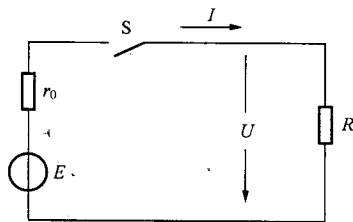


图 1-5 具有一个电动势的全电路

在一个闭合电路中，电位的升高应该等于电位的降低，即电动势应该等于所有电压降之和，即

$$E = U + U_0 = IR + Ir_0$$

或

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-4)$$

式中 E ——电源电势，V；

R ——外电路电阻， Ω ；

r_0 ——电源内阻， Ω 。

式 (1-4) 就是全电路欧姆定律的数学表达式。

全电路欧姆定律的定义是：在闭合回路中，电流的大小与电源的电动势成正比，而与整

个电路的内外电阻之和成反比。

变换式 (1-4) 得: $IR = E - Ir_0$, 即 $U = E - Ir_0$, 该式表明电源两端的电压 U 要随电流的增大而下降。这是由于电源内阻压降所造成的, 因为电流越大, 电源内阻压降 Ir_0 也越大, 所以电源两端输出的电压 U 就越低。

当电源的内阻很小 (相对负载电阻而言) 时, 则可认为 $U = E - Ir_0 \approx E$, 即电源的端电压近似等于电源的电动势。一般没有特殊指明电源的内阻时, 就表示电源的电阻忽略不计。

三、电阻的串联、并联和复联

1. 电阻的串联

几个电阻首尾依次相连, 中间没有分岔的连接方法, 叫做电阻的串联。如图 1-6 表示 3 个电阻的串联电路。电阻串联电路的特点是:

(1) 流过每个电阻的电流相同, 即

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \quad (1-5)$$

(2) 总电压等于各电阻分电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (1-6)$$

(3) 总电阻等于各电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1-7)$$

(4) 各电阻两端的电压跟它的阻值成正比, 即

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots = \frac{U_n}{R_n} = I \quad (1-8)$$

各电阻的分电压与电路总电压的关系由分压公式表示, 即

$$U_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} U \quad (1-9)$$

(5) 各电阻消耗的功率跟它的阻值成正比, 即

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \dots = \frac{P_n}{R_n} = I^2 \quad (1-10)$$

2. 电阻的并联

将几个电阻接在电路中相同两点之间的连接方法叫电阻的并联。如图 1-7 表示两个电阻的并联电路。电阻并联电路的特点是:

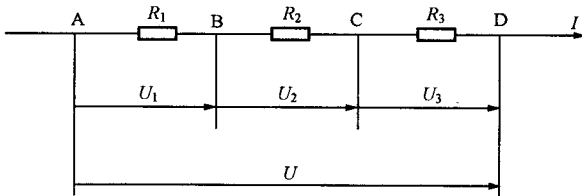


图 1-6 电阻的串联电路

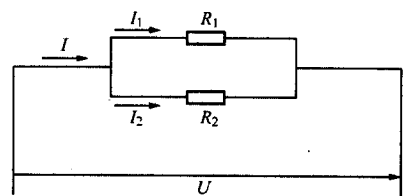


图 1-7 电阻的并联电路

(1) 各电阻两端的电压相等, 即

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = U \quad (1-11)$$

(2) 总电流等于各支路电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (1-12)$$

(3) 总电阻的倒数等于各电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad (1-13)$$

如果两个电阻并联,则

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

如 n 个阻值相等的电阻并联,则 $R = \frac{R_n}{n}$

(4) 通过各电阻的电流跟它的阻值成反比,即

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = \cdots = I_n R_n = U \quad (1-14)$$

两个并联电阻的分流公式为

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

(5) 各电阻消耗的功率跟它的阻值成反比,即

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = \cdots = P_n R_n = U^2 \quad (1-16)$$

3. 电阻的复联

在一个电路中,既有并联的电阻又有串联的电阻,称为电阻的复联电路或混联电路,如图1-8(a)所示。求复联电路的总电阻时,先求出每条支路的等效电阻,再求出各并联支路的等效电阻,最后求出总电路的等效电阻,如图1-8(b)、(c)、(d)所示。

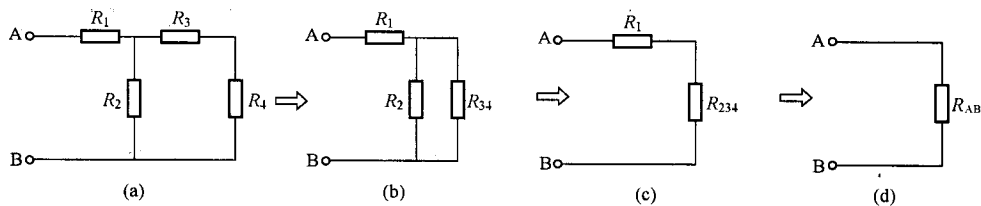


图 1-8 复联电路及求其总电阻的步骤

四、电功率与电能

1. 电功率

电流通过电动机带动机器工作,电流通过电炉产生大量的热,电流通过电灯使它发光,这些都说明电流做了功。在 1s 内电流所做的功叫做电功率,简称功率。电功率计算公式有 3 种形式:

(1) 功率等于电压与电流的乘积,即

$$P = UI \quad (1-17)$$

式中 P ——电功率, W;

U ——电压, V;

I ——电流, A。

式(1-17)表明:负载承受的电压越高,电功率越大;流过负载的电流越大,负载的电功率也越大。电功率的单位是 W (瓦) 或 kW (千瓦)。

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

(2) 负载的电功率与其电压的平方成正比,即

$$P = I^2 R \quad (1-18)$$

式(1-18)表明,电阻消耗的电功率和流过它的电流的平方成正比。

(3) 负载的电功率与其电压的平方成正比,即

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (1-19)$$

式(1-19)表明,当电路电阻一定时,电阻所消耗的电功率与其电压的平方成正比。

2. 电能

电能就是电流在一段时间内流经导体,电流所做的功。电能等于电功率与时间的乘积。其计算式为

$$W = Pt \quad (1-20)$$

式中 W ——电能, kWh;

P ——电功率, kW;

t ——时间, h。

电能的单位用 kWh (千瓦·时) 表示,又称为度。电能可以用电能表来计量。

五、基尔霍夫定律

欧姆定律表明了线性电阻元件两端电压、电流之间的关系,即电路中某一个局部的电压、电流关系。而基尔霍夫定律则是从电路的全局和整体上,阐明了各部分电压、电流之间所必须遵循的规律,在电路的分析和计算方面具有十分重要的作用。

为了说明基尔霍夫定律的内容,先介绍几个有关的概念:

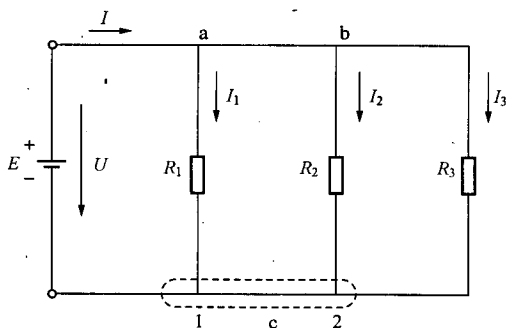


图 1-9 电路的节点、支路和回路

节点: 电路中 3 条或 3 条以上连接有电气元件的导线的交点。如图 1-9 所示 a 点、 b 点都是节点。

支路: 连接任何两个节点之间的一段电路叫支路。如图 1-9 所示 a 、 b 两节点之间包含有电阻 R 的一段电路就是一条支路。

回路: 电路中任何一个闭合的路径叫回路。一个回路可能只含一条支路,也可能包含几条支路。如图 1-9 所示 EbR_2c , EbR_3c 都是回路。

网孔: 在任何一个回路中间没有支路穿过的电路。如图 1-9 所示 Eac 。

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律也叫节点电流定律。其内容是:流入节点的电流之和等于流出该节点的电流之和,写成一般表达式为: $\sum I_{入} = \sum I_{出}$ 。如果我们规定流入节点的电流为正,流出节点的电流为负,用一个普遍的公式表达为

$$\sum I = 0 \quad (1-21)$$

即在电路的任一节点上,流入和流出节点的电流的代数和等于零。

对图 1-9 中 3 个电阻上端的一个节点 (ab), 可以写出 $I - I_1 - I_2 - I_3 = 0$, 而对下端的一个节点 (c), 可以写出 $I_1 + I_2 + I_3 - I = 0$ 。

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律又叫回路电压定律,它阐述了在任一闭合回路中各电动势和各电阻上

的电压降的关系。如图 1-10 所示是从某一复杂回路中摘取的一个闭合回路，回路中所有电动势的极性已经给定，各支路电流的方向都是假定的，如果从回路的任意一点开始，沿回路绕行一周，电位升高的数值必然等于电位降低的数值，现在我们从 A 点开始，沿着顺时针方向绕行；分别计算出各点电位如下：在 A-B 段，自 A 点经过电源 E_1 ，产生电位升高，升高的数值即 E_1 ，再经过 R_1 ，产生电位降低，降低的数值为 I_1R_1 ，因此 B 点的电位为

$$\varphi_B = \varphi_A + E_1 - I_1R_1$$

同理，C 点、D 点、A 点的电位为

$$\varphi_C = \varphi_B - E_2 + I_2R_2$$

$$\varphi_D = \varphi_C - I_3R_3 + E_3$$

$$\varphi_A = \varphi_D - I_4R_4$$

将上面 4 个等式相加并进行整理后得到

$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1R_1 - I_2R_2 + I_3R_3 + I_4R_4$$

上式表明：在任一回路中，沿任一绕行方向，回路中电动势的代数和等于电阻上电压降的代数和，这就是基尔霍夫第二定律，用一公式可写作

$$\sum E = \sum IR \quad (1-22)$$

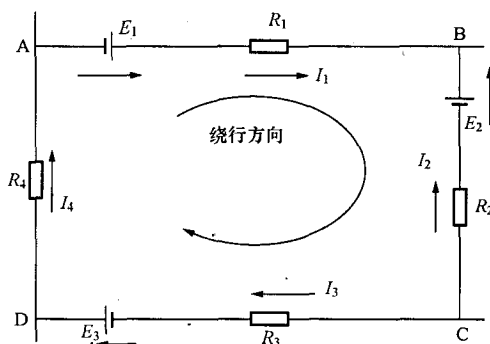


图 1-10 基尔霍夫第二定律

六、电流的热效应、短路

1. 电流的热效应

电流通过导体时，由于自由电子的碰撞，电能就不断地转变为热能，这种电流通过导体会产生热的现象，称为电流的热效应。实验结果表明，电流通过某段导体时所产生的热量与电流的平方、这段导体的电阻以及通过电流的时间成正比。

电能与热能的转化关系表示为

$$Q = I^2Rt = W \quad (1-23)$$

式中 I ——导体中通过的电流，A；

W ——消耗的电能，J；

R ——导体的电阻， Ω ；

Q ——导体产生的热量，J；

t ——电流通过导体的时间，s。

式 (1-23) 亦叫做焦耳—楞次定律。

为了使电气设备在正常温度下运行，必须对每一个电气设备规定最大允许功率，通常称为额定功率。在电压不变的情况下，也可以规定最大允许电流，称为额定电流。在用电器的电阻值不变时，也可以规定额定电压，由于各种电气设备所使用的绝缘材料耐温性能不同、导线截面积不同、散热条件不同，因此规定的额定功率、额定电流或额定电压也就不同。电气设备的额定数据一般标在铭牌上，也可以从产品目录中查得。当电气设备加上额定电压，消耗额定功率时，这种工作状态称为“满载”，或者叫做额定工作状态。如果超过额定电流或额定功率，则称为过载，过载会导致电气设备的损坏。

2. 短路

如果电源通向负载的两根导线不经过负载而相互直接接通，就发生了电源被短路的情

况。这时电路中的电流可能增大到远远超过导线所允许的电流限度。

短路会造成电气设备的过热，甚至烧毁电气设备，引起火灾。同时，短路电流还会产生很大的电动力，造成电气设备损坏。严重的短路事故甚至还会破坏系统稳定。所以对运行中的电气设备应采取一定的保护措施，例如安装自动开关、熔断器等，当发生短路故障时，这些装置可将短路点及时切除，以限制短路造成的破坏。在使用电气设备时，如果出现断电故障，应首先检查电路中熔丝是否烧断，如果熔丝已烧断，可切断电源，换上同样粗细的熔丝，通上电源，看设备运行是否正常，如果熔丝又立即烧断，则应断电检查线路与用电器，是否有短路或其他故障，切不可因熔丝连续烧断而随意增加熔丝截面，甚至用铜丝代替，这样，将失去熔丝的短路保护作用，最后会烧坏电气设备。

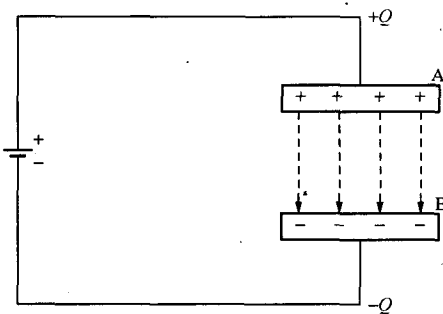


图 1-11 电容器能储存电荷

七、电容量

1. 电容器和电容量

任何两个金属导体，中间隔以不导电的绝缘物质，就形成一个电容器。通常把组成电容器的两个导体叫做极板，而把中间的绝缘物质叫做介质。由于电容器最基本的特性是能够储存电荷，所以有时又把电容器定义为能够储存电荷的容器。如图 1-11 所示，当电容器的两个极板接上直流电源时，在电场力的作用下，电源负极的自由电子将移动到与它相连的极板 B 上，使极板 B 带上负电荷。同时，

电源正极使极板 A 带上等量的正电荷。对于结构一定的电容器，其中任何一个极板上所储存的电量与两极板间电压的比值是一个常数，这个常数叫电容量，简称电容，用 C 表示，即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-24)$$

式中 Q ——一个极板上所储存的电量， C ；

U ——两极板间的电压， V ；

C ——电容， F 。

电容量 C 只决定于电容器的结构，它表征在一定电压下储存电荷的能力。电容量的单位是法拉，简称法，用 F 表示。在实际应用中，常用较小单位， μF （微法）和 pF （皮法）。

$$1\mu F = 10^{-6} F; 1pF = 10^{-6} \mu F = 10^{-12} F。$$

2. 电容器的串联

两个或两个以上的电容器，以首尾相连的连接方式相连，叫做电容器的串联。如图 1-12 所示是两个电容器的串联。串联电容器有以下几个特点：

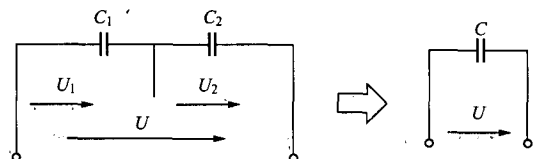


图 1-12 两个电容器的串联

(1) 每个电容器上所带电量都相等，并等于电容器串联后的等效电容器上所带的电量 Q ，即

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n \quad (1-25)$$

(2) 总电压等于各个电容器两端电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n \quad (1-26)$$

(3) 串联电容器的等效电容量的倒数等于各个电容器的电容量的倒数之和

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (1-27)$$

对于两个电容器的串联有如下关系

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1-28)$$

(4) 串联电容器两端所承受的电压与容量成反比。两个电容器串联时，各电容器两端承受的电压分别为

$$U_1 = \frac{C_2 U}{C_1 + C_2}; \quad U_2 = \frac{C_1 U}{C_1 + C_2} \quad (1-29)$$

由此可见，串联电容器的等效容量，总是小于其中任意一个电容器的容量，而且串联电容器越多，总的等效容量越小。另外，在电容器串联中，容量越小的电容器所承受的电压越高，在实际使用中，必须慎重考虑各个电容器的耐压情况，否则容易造成击穿事故。

3. 电容器的并联

两个或两个以上的电容器，同接在两点之间，这种连接方式叫做电容器的并联。如图 1-13 所示是两个电容器的并联。并联电容器有以下几个特点：

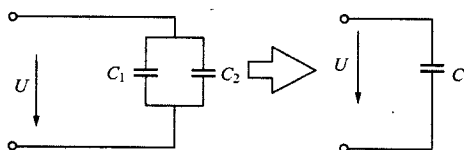


图 1-13 两个电容器的并联

(1) 各个电容器两端的电压相同，并等于外加电压 U ，即

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \quad (1-30)$$

(2) 各并联电容器的等效电容器所带电量 Q 等于各个电容器的电量之和，即

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (1-31)$$

(3) 并联后的等效电容量 C 等于各个电容器的电容量之和，即

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (1-32)$$

由此可见，并联电容器的等效电容量，总是大于其中任何一个电容器的电容量，而且并联电容器越多，总的等效电容量越大。因此，在单个电容器的电容量不足的情况下，可以用几个电容器并联使用。

4. 电容器的充放电

(1) 电容器充电：把电容为 C 的电容器与电阻 R 串联后，接到电压为 U 的直充电源的两端，如图 1-14 所示。当开关 S 与 A 点接通时，电源两端的电场力使电荷移动，电容器被充电。在电路刚刚接通瞬间，充电电流最大，即 $i_{充} = U/R$ 。随着充电的进行，电容器极板上不断累积电荷，两极板间的电压 u_C 逐渐增高，电流的端电压 U 与电容器两板间的电压 u_C 之差逐渐减小，使充电电流 i 也不断减小。最后，当充电电流衰减到零时， R 上就没有电压降了，电容器的电压 u_C 就升高到与电源电压 U 相等，电容器充电完毕。电容器充电时电压 u_C 从零逐渐上升到

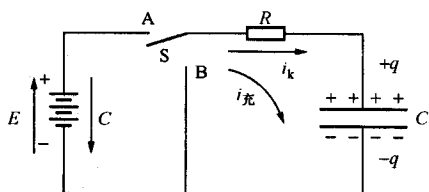


图 1-14 电容器充电

U , 电流 i 从最大衰减到零, 这一变化过程叫做过渡过程, 当 i 减弱到零, u_c 上升到 U 后; 它们都稳定不变, 叫做稳定过程。由实验可以得出, 电容器充电时, 电流 i 和电压 u_c 随时间而变化的规律, 如图 1-15 所示。它的数学表达式为

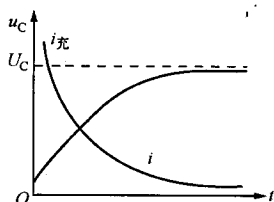


图 1-15 充电时电容器的端电压和电流的变化曲线

$$u_c = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (1-33)$$

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-34)$$

从理论上讲, 只有时间无限长时, 电容器上的电压才能达到电源的端电压, 充电电流才能等于零。但实际上, 当充电时间 $t = 4 \sim 5RC$ 时, 电容器两极板上的电压 u_c 就可以近似地认为达到稳定, 电流 i 就接近零, 充电过程就算完毕。乘积 RC 叫做时间常数, 用 τ 表示, 单位用秒计算。故由时间常数的值可以决定 u_c 或 i 达到某一值所需的时间。

(2) 电容器放电: 电容器充电后, 若把开关 S 从 A 点很快扳到 B 点, 则电容器处于放电过程, 如图 1-16 所示。这时电容器与电阻串联成闭合电路, 电容器开始放电。因为电容器两极板上累积了正负电荷, 两极板间形成电位差, 使电荷反方向移动。但电路刚刚接通瞬间, 放电电流最大, 即 $i_{\text{放}} = U/R$ 。随着电容器两极板上的电荷不断减少, 两极板间的电压就逐渐降低, 最后两极板上的电荷互相抵消, 电容器的电压衰减到零, 放电电流也等于零, 放电完毕。电容器放电时电流 i 和电压 u_c 随时间而变化的规律, 如图 1-17 所示。

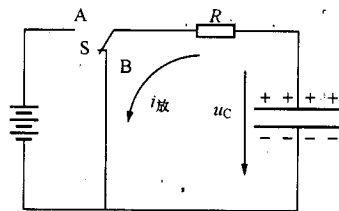


图 1-16 电容器放电

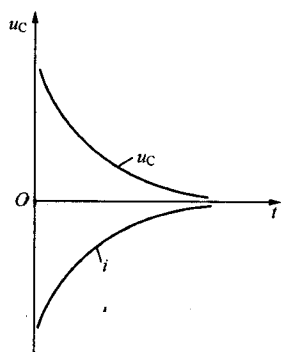


图 1-17 电容器放电时电流和电压的变化曲线

为了使图形明显直观, 便于与放电时的图形比较, 若取充电电流的方向为正, 则放电电流的方向为负, 即与 u_c 方向相同。它的与数学表达式为

$$u_c = Ue^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-35)$$

$$i = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-36)$$

式中时间常数 RC 决定电容器的电压和电流的衰减速度。从上面分析可知, 电容器不论是充电或放电, 其两端的电压是不能突变的, 只能随时间按指数规律从一个数值逐渐过渡到另一数值; 过渡的快慢 (即充放电的快慢) 取决于时间常数 RC 。还应提出的是稳定的直流电流不能通过电容器, 这叫做电容器的隔直作用。但在交流电路中, 由于电容器不断地充放电, 电极引线上始终有充放电电流流过, 所以交流电流可以通过电容器。

第二节 电磁和电磁感应

一、磁的基本知识

磁铁具有吸铁的性质, 称为磁性。

任一磁铁均有两个磁极: 即 N 极 (北极) 和 S 极 (南极)。磁铁端部磁性最强, 越接近

中央磁性越弱。

同性磁极相斥，异性磁极相吸。

磁铁能吸铁的空间，称为磁场。为了形象化，常用磁力线来描绘磁场的分布。磁力线在磁铁外部是由N极到S极，在磁铁内部由S极到N极。磁力线是互不相交的连续不断的曲线，磁场强的地方磁力线较密，磁场弱的地方磁力线较疏。磁力线分布情况如图1-18所示。

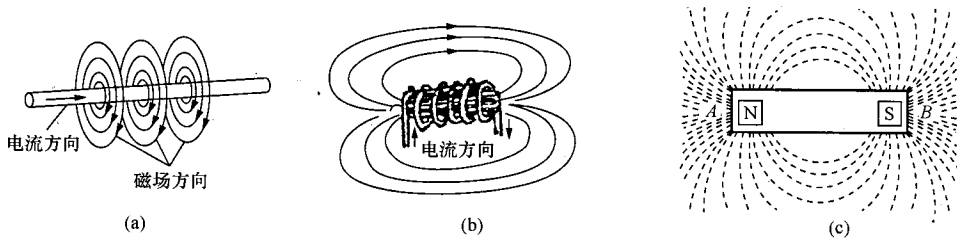


图1-18 磁力线分布情况

(a) 直导体磁场；(b) 螺线管的磁场；(c) 永久磁铁的磁场

不带磁性的物质具有磁性的过程叫磁化。物质能显示磁性是由于磁性分子得到有规则的排列。

载流导体周围存在着磁场，即电流产生磁场（电能生磁），称电流的磁效应。

电流的磁效应，使我们能够容易地控制磁场的产生和消失，这在生产实践中有着重要意义。

直导体（或螺线管）周围磁场（磁力线）的方向，可用右手螺旋定则来判断：

(1) 通电直导体磁场方向的判断方法。用右手握住导线，大拇指指向电流的方向，则其余四指所指的方向就是磁场的方向，如图1-19(a)所示。

(2) 螺线管磁场方向的判断方法。将右手的大拇指伸直，其余四指沿着电流方向围绕绕组，则大拇指所指的方向就是绕组内部的磁场方向，如图1-19(b)所示。

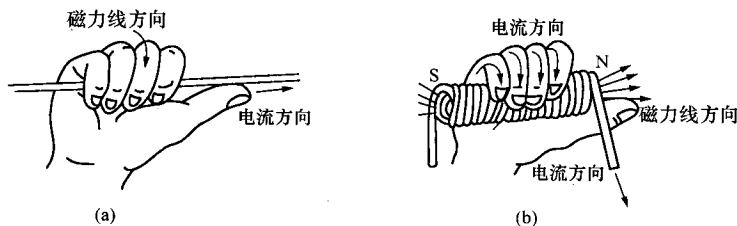


图1-19 用右手螺旋定则判断磁场方向

(a) 直导体；(b) 螺线管

实验证明：通电导线在磁场中会受到力的作用，叫做电磁力或电动力。电动机和测量电流电压用的磁电式仪表，就是应用这个原理制成的。

二、磁场的几个基本物理量

1. 磁感应强度 (B)

磁感应强度是定量描述磁场中各点的强弱和方向的物理量。在磁场中与磁场方向垂直的载流导体，受到的磁场作用力 F 与导体中的电流强度 I 和导线长度 l 的乘积的比值叫做该点