



科学器材试用教材

机械电工部分

第二分册

电工器材基础知识



中国科学院技术条件及进出口局
中国科学院管理干部学院

前 言

中共中央[1681]10号文件指出,科学院要抓好科研工作的基本建设。抓好器材工作,改善实验手段,是科研工作基本性建设的一个重要组成部份。

为建设一支具有高度文化知识和管理技术的科学器材队伍,适应科技现代化的需要,我院委托浙江大学、成都科技大学、西安光机所等单位编写了这套器材干部学习材料。定名为《科学器材试用教材》。全套书分为:仪器仪表、机械电工、材料、电子测量仪器、科学器材供应与管理五部分。其中:

仪器仪表:包括科学仪器与工业自动仪表,十五个分册,由黄邦达同志主编;

机械电工:包括机械设备和电工器材,两个分册,由赵沔、李全铭二同志主编;

材料:包括金属材料和非金属材料,由佟绵川、胡仲培二同志主编;

电子测量仪器:由吴景渊、孙焕根二同志主编;

科学器材供应与管理:由陈东还同志主编;

此教材是根据器材工作的特点和我院常用的科学器材编写的。着重介绍科学器材的基本结构、原理、性能、参数、用途、使用维护技术及国内外发展动态。内容力求深入浅出,通俗易懂。

本教材适合具有一定工作经验的在职器材干部学习,也可作为培训具有高中文化程度的年青的器材干部的试用教材,还可供从事科研、生产、教学等部门实验、计划、管理干部学习参考。

在当今科学发展的情况下,科学器材日新月异,更新的速度也随之加速。此教材仅选择当前科学研究常用的仪器、设备和材料,今后将随着科学技术的发展不断地充实提高。

在教材编写过程中,得到了浙江大学、成都科技大学、厦门大学等单位的大力支持,谨致以衷心的感谢。向所有参加教材编写,修改及讨论工作的教师、科研和器材人员表示衷心的感谢。

这套教材是按照科学器材工作的要求和特点组织编写的,由于缺乏经验,不足之处在所难免,希望读者提出宝贵意见。

中国科学院技术条件及进出口局

中国科学院干部进修学院

一九八二年六月二十六日

目 录

第一章 电工基础知识	(1)
第一节 直流电路.....	(1)
第二节 电磁基本知识及应用.....	(12)
第三节 单相交流电路.....	(22)
第四节 三相交流电路.....	(30)
第二章 电机及变压器	(35)
第一节 变压器.....	(35)
第二节 调压器及移相器.....	(45)
第三节 一般交流发电机.....	(49)
第四节 交流电动机.....	(57)
第五节 直流电机.....	(69)
第六节 分马力电动机.....	(80)
第七节 控制电机.....	(91)
第八节 中频电源——中频发电机.....	(103)
附：变压器及电机在保管方面 注意事项.....	(108)
第三章 常用电工仪表	(111)
第一节 电工仪表的分类.....	(111)
第二节 直读式仪表.....	(117)
第三节 万用表.....	(130)
第四节 比较式仪表.....	(134)
第五节 光线示波器.....	(145)
第四章 电源	(151)
第一节 整流元件概述.....	(151)
第二节 整流器.....	(156)
第三节 直流稳压电源及直流调压电源.....	(162)
第四节 直流恒流电源.....	(178)
第五节 交流稳压电源及调压电源.....	(180)
第六节 可控硅逆变器.....	(185)
第七节 铅酸蓄电池.....	(191)
第八节 碱性蓄电池.....	(194)
第五章 电器	(200)
第一节 概述.....	(200)
第二节 刀开关、转换开关和熔断器.....	(203)
第三节 主令电器.....	(217)
第四节 接触器和自动开关.....	(225)
第五节 继电器.....	(241)

第六节	起动器	(264)
第七节	电磁铁、电磁离合器	(271)
第八节	电阻器、变阻器	(274)
第九节	电瓷和避雷器	(279)
第十节	高压断路器和隔离开关	(292)
第十一节	电力电容器	(298)
第六章	工业电炉	(305)
第一节	概述	(305)
第二节	电阻炉	(306)
第三节	感应炉	(320)
第四节	其他电炉	(327)
第七章	绝缘材料	(335)
第一节	概述	(335)
第二节	绝缘材料的性能	(337)
第三节	液体绝缘材料	(342)
第四节	电工用塑料及薄膜	(343)
第五节	绝缘漆、熔敷粉末和绝缘胶	(246)
第六节	绝缘纤维材料及其浸渍、层压制品	(348)
第七节	绝缘云母及云母制品	(352)
第八节	电工用橡胶	(354)
第九节	绝缘材料的保管	(356)
第八章	电线电缆	(360)
第一节	概述	(360)
第二节	裸电线	(360)
第三节	绝缘线	(365)
第四节	电缆	(370)
第五节	电线电缆选用简介	(380)
第六节	电线电缆的保管	(387)

第一章 电工基础知识

第一节 直流电路

一、电路的组成

电流所流经的路径叫做电路。图1-1是最简单电路的例子。它由电池E、电灯泡R、开关K和金属连线所组成。当我们将开关闭合，金属连线就将电池和电灯泡连成通路，电路中就有电流通过，使电灯泡发光。其中电池提供电能，称为电源。电灯泡是用电装置，称为负载。金属连线起了传导电流的作用，称为导线。故图1-1就是由一个电源、一个负载、一个开关和导线所组成的简单电路。



图1-1 最简单的电路

复杂电路的电源和负载都不只一个，还常带有一些附属设备如保险器和控制器等。

电路分外电路和内电路。对电源来讲，负载和连接导线以及开关等附属设备叫外电路。电源内部的通路叫内电路，如电池二极之间的通路。

二、电流、电压（电位差）与电动势

（一）电流

在电源作用下，闭合回路中就会产生电流。什么是电流呢？电流就是电荷的有规则的定向运动。导体内的自由电子或离子受到一定方向的外力作用，成群电子或离子会向一定方向有秩序地流动，因而形成电流。

电流的大小用电流强度表示，简称电流。它等于单位时间里通过导体横截面的电荷量。即

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

式中：Q——电荷量、单位库仑（简称库）

t——时间、单位秒

I——电流、单位安培（简称安）

若在1秒钟内通过导体横截面的电量是1库，则导体内的电流就是1安，通常用符号“A”来表示安。大电流常采用千安(KA)表示(1 KA = 10³A)。小电流常用毫安(mA)和微安(μA)表示(1 mA = 10⁻³A, 1 μA = 10⁻⁶A)。

规定正电荷流动的方向为电流的正方向。大小和方向都不随时间变化的电流叫做直流。由于电池、蓄电池、直流发电机作电源所产生的电流都是直流。

在选用导线截面时，要用到电流密度J，即通过导线单位截面的电流强度， $J = \frac{I}{S}$ 。如电流I的单位为安，截面S的单位为毫米²，则J的单位为安/毫米²。

(二) 电位与电压(电位差)

1. 水由高处流向低处是因为高处的水位高, 低处的水位低。与此类似。带电物体也具有电位。带正电荷的物体具有高电位, 带负电荷的物体具有低电位。电路中每一点都有一定的电位, 就如同空间每一处都有一定的高度一样。计算高度要有一个起始的参考点, 地面上各处的高度是以海平面作为计算的起点。同样, 计算电位也要有一个起始的参考点(即零电位点)。通常, 在电力线路中, 以大地作为零电位点, 而在电子线路中, 则以机壳, 底座或某公共点作为零电位点。

电位以字母“ Φ ”表示, 它的单位是伏特(简称伏)。

应该注意某点电位的数值与参考点的选择有关。例如, 有二个电源, 一个为 4 伏, 一个为 5 伏, 把它们顺向串接, 若将 A 点接地(如图 1-2 a), 即 Φ_A 为零电位, 则 B 点电位(Φ_B)为正 4 伏, C 点电位(Φ_C)为正 9 伏; 若将 B 点接地(如图 1-2 b)。即 Φ_B 为零电位, 则 Φ_A 为负 4 伏, Φ_C 为正 5 伏。这说明, 当参考点改变时, 各点电位要随之改变。

2. 如上所述, 某点电位的数值与参考点的选择有关; 但是, 两点间的电位差则与参考点的选择无关。在图 1-2a 中, $\Phi_C - \Phi_A = 9 - 0 = 9$ 伏; 在图 1-2 b 中: $\Phi_C - \Phi_A = 5 - (-4) = 9$ 伏。

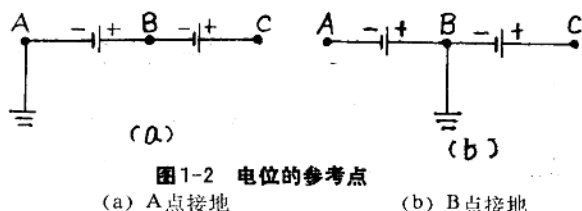


图1-2 电位的参考点

(a) A点接地

(b) B点接地

任意两点间的电位差称为该两点间的电压, 用字母 U 表示。对于图 1-2, C 点和 A 点之间的电压, 即为

$$U_{CA} = \Phi_C - \Phi_A = 9 \text{ 伏}$$

正如水位差是形成水流的原因, 水由高水位流向低水位; 电位差则是形成电流的原因。当电路中存在电压(即有电位差), 在接通负载以后, 便有电流由高电位经负载流向低电位。

电压的单位也是伏特(V)。

电压的单位还有千伏(KV)毫伏(mV)和微伏(μV)。 $1 \text{ KV} = 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$, $1 \mu V = 10^{-6} \text{ V}$ 。

(三) 电动势

电位差是产生电流的原因, 要使电路中不断有电流通过。在电路两端就必须保持一定的电位差(电压)。电路两端的电位差是由电源来维持的。这是因为电源内部由于外力的作用(如化学反应、光电效应、热电效应、电磁感应等), 能将非电能(如化学能、光能、热能、机械能等)转变为电能, 它可以使正电荷获得能量, 从低电位经过电源内部而移向高电位, 从而维持电源的正、负极间有一定的电位差, 使电路中保持电流。由此可见, 电源是把非电能转换成电能的装置, 电源内部由于其他形式的能量转换为电能所引起的电位差叫做电动势, 用字母 E 表示, 单位也为伏特。

对于整个闭合回路, 应该注意:

(1) 在外电路中, 电流在电压作用下, 由高电位流向低电位。这就规定了电压的正方向是从高电位到低电位, 这也是电位降(电压降)的方向。

(2) 在内电路中, 电流在电源外力作用下, 从低电位流到高电位。这就规定了电动势

的正方向是从低电位到高电位，这也是电位升高的方向。

三、电阻

导体能够导电，但对电流又有一定的阻碍作用，这种阻碍作用是由于自由电子在导体中作定向运动时和原子发生碰撞产生的。导体的这种对电流的阻碍作用称为电阻，用字母“R”或“r”表示。

电阻的单位是欧姆，简称欧，通常用“Ω”表示。对较高的电阻值，常用千欧（KΩ）或兆欧（MΩ）作为单位。 $1\text{K}\Omega = 10^3\Omega$ ， $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ 。

导体的电阻除和材料有关外，在一定的温度下，均匀导体的电阻和导体的长度成正比，而和导体的截面积成反比，即

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

式中：R——导体的电阻，单位为欧

L——导体的长度，单位为米；

S——导体的横截面，单位为毫米²；

ρ——导体的电阻率，单位为欧·毫米²/米；

γ——导体的电导率，是电阻率的倒数。

导体的电阻率ρ是指长度为1米，截面积为1平方毫米的均匀导体在温度为20℃时所具有的电阻值。表1-1列出几种常用材料的电阻率。

表1-1 材料的电阻率和电阻温度系数

用 途	材 料 名 称	电阻率 ρ (欧·毫米 ² /米) [20℃]	平均温度系数 α [0~100℃](1/℃)
导 电 材 料	碳	10.0	-0.0005
	银	0.0165	0.0036
	铜	0.0175	0.004
	铝	0.0283	0.004
	低碳钢	0.13	0.006
电 阻 材 料	锰 铜	0.42	0.000005
	康 铜	0.44	0.000005
	镍铬铁	1.0	0.00013
	铝铬铁	1.2	0.00008
	铂	0.106	0.00389

导体电阻的大小还和温度有关，如果在温度为 t_1 时，导体的电阻为 R_1 ，在温度为 t_2 时，导体的电阻为 R_2 ，则

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2 - t_1) \quad (1-3)$$

式中，α称为电阻的温度系数，单位为1/℃。

常用材料的电阻温度系数也列于表1-1中。

四、欧姆定律及其应用

(一)一段电路的欧姆定律

根据实验,在一段不含电动势而只有电阻的电路中,流过电阻的电流大小和加在电阻两端的电压成正比,而与电路中的电阻成反比,称为一段电路的欧姆定律。它的数学表示式如下:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{或} \quad U = IR \quad \text{或} \quad R = \frac{U}{I} \quad (1-4)$$

式中, I 为电流, 单位安; U 为电压, 单位伏; R 为电阻, 单位欧。

(二)全电路的欧姆定律

一段电路的欧姆定律是仅就负载电阻 R 以及加于 R 两端的电压 U 和流过 R 的电流 I 三者的关系而言。但是, 实际电路既包含电源, 又包含负载, 且电源内部也有电阻存在。称为内阻, 以 r_0 表示。对于一个电源的无分支闭合电路 (图 1-3)。电流 I 与电源电动势 E 成正比, 与负载电阻和电源内阻之和 $(R + r_0)$ 成反比, 这就叫作全电路的欧姆定律, 用公式表示如下:

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad \text{或} \quad E = IR + Ir_0 \quad (1-5)$$

因端电压 $U = IR$, 故上式可写为:

$$E = U + Ir_0 \quad \text{或} \quad U = E - Ir_0 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 中, U 是负载两端的端电压, 若不计导线的电阻, 也就是电源的端电压。 Ir_0 称为电源内部电压降。电路闭合时, 电源的端电压等于电源电动势 E 减去电源内部电压降 Ir_0 。

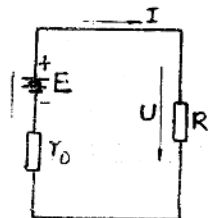


图1-3 包括电源和内阻的电路图

在通常情况下, 可以认为电源电动势和内电阻是常数, 而且 R 比 r_0 大得多, 外电路的端电压非常接近于电源电动势。因此, 有时也将电源内部电压降 Ir_0 略去不计。

(三)开路和短路

1. 开路 (断路)

当外电路未接通即 $R = \infty$ 时, 称为开路状态。此时 $I = 0$, $U = E - Ir_0 = E$ 。即开路时, 电路端电压在数值上等于电源电动势。

2. 短路

当外电路电阻 R 逐渐减小时, 从式 $I = \frac{E}{R + r_0}$ 中可以看出, 电路中电流 I 将不断增大。当 $R = 0$ 时, 此时电路称为短路状态。短路时电流达最大值。用 I_D 表示短路电流, 则 $I_D = \frac{E}{r_0}$ 。由于 r_0 的数值通常很小, I_D 一般很大, 不仅会损坏电气设备, 还会引起火灾和爆炸等严重事故。因此, 在电路中必须装设保护装置, 在发生短路故障时, 能迅速切除故障部分的电路, 以保护电气设备, 防止事故扩大。

五、电阻的联接

以上讲的是只有一个电源和一个负载的最简单电路。实际电路中，常常不只是联接一个负载，而是联着许多负载。这些负载可以按不同需要，以不同方式连接起来，其中最基本，应用最广泛的是串联和并联。

(一) 电阻的串联

电阻的串联就是把电阻一个接一个依次联接起来，中间没有分支，使电流只有一条通路，图1-4 a就是电阻 R_1 和 R_2 的串联电路。

串联电路有以下几个特点：

1. 各电阻中流过的电流相等。
2. 各电阻上电压降之和等于总电压。
3. 各电阻上电压降与各自的电阻值成正比。

4. 电路中等效电阻（即总电阻）等于各段电阻之和。即

$$R = R_1 + R_2$$

可见，电阻串联愈多，等效电阻愈大。

通常用串联电阻来达到限流，分压及降压的目的。

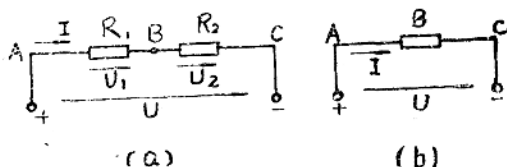


图1-4 电阻的串联

(a) 实际电路

(b) 等效电路

(1-7)

(二) 电阻的并联

电阻的并联即是每个电阻的两端相互联接在一起。并联时每个电阻两端所受的电压是相同的，图1-5 a为 R_1 和 R_2 的并联电路。一般负载多为并联电路。

并联电路有以下特点：

1. 并联电阻两端加的是同一个电压。
2. 并联电路的总电流等于各分电流之和，即 $I = I_1 + I_2$ 。

3. 电阻并联的等效电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和。即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{或} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

(1-8)

若多个电阻并联，则 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

并联的电阻愈多，则等效电阻（总电阻）愈小，且总电阻小于任何一个支路的电阻。

(三) 电阻的混联

实际电路中，常常是既有串联又有并联（混联），在图1-6中， R_3 和 R_4 并联后，再与 R_1

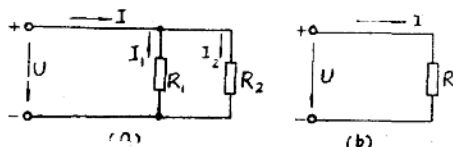


图1-5 并联电路

(a) 实际电路

(b) 等效电路

和 R_2 串联，这就是一个混联电路，其等效电阻 R 可由下式计算，

$$R = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4}$$

混联电路一般可按以下步骤进行计算：

1. 应用电阻串联和并联的公式把电路化简，然后求出电路总的等效电阻；

2. 应用欧姆定律求出总电流；

3. 根据总电流求出各支路电流。

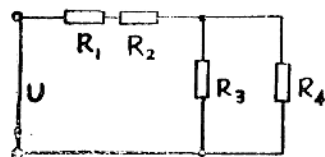


图1-6 混联电路

六、电功和电功率

(一) 电功

电流所作的功叫电功。例如电流通过电动机带动机器转动，电流通过电灯会发光。电流通过电炉会发热等。象这些把电能转化为其它形式能量的例子，都说明电流做了功。

根据实验：电流通过负载 R 所作的功 W 与负载两端的电压 U ，通过负载的电流 I 及通电时间 t 三者的乘积成正比。以式表之如下：

$$W = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-9)$$

若 U 的单位为伏， I 的单位为安， t 的单位为秒，则功 W 的单位是焦耳。

1 焦耳 = 1 伏安秒 = 1 瓦秒

工程上常以千瓦时为计算电功的实用单位。1 千瓦小时就是平常所说的一度电。

(二) 电功率

单位时间内电流所作的功叫做电功率。即

$$\text{电功率} \quad P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-10)$$

上式说明，电功率等于电压 U 和电流 I 的乘积。若电压的单位为伏，电流的单位为安，则电功率的单位是瓦(W)。工程上常采用较大单位千瓦(KW)。1 KW = 10³W。还有以马力(HP)作为功率单位的。1 KW = 1.36HP (公制)。1 HP = 0.736KW。

(三) 电流的热效应

当电流通过电阻时，电阻的温度会逐渐升高。这是因为电能经过电阻转换成了热能。电阻炉、电烙铁就是利用电流的这种热效应产生所需要的热量。

根据楞次-焦耳定律，电流通过导体时所产生的热量 Q 和电流值 I 的平方，导体本身的电阻值 R 以及电流通过的时间 t 成正比。即

$$Q = 0.24 I^2 R t (\text{卡}) \quad (1-11)$$

式中，0.24为热功当量，它相当于电阻为一欧的导体通过一安的电流时每秒钟产生的热量。

(四) 电气设备的额定值

为了使电气设备安全、经济地运行，并保证一定的使用寿命，制造厂对于产品都规定了

额定值（如额定电压、额定电流、额定转速等等）。大多数电气设备的寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当通过电气设备的电流超过额定值过多时，由于发热过甚，绝缘材料将会损坏；当所加电压超过额定值过多时，绝缘材料可能被击穿。反过来说。如果使用的电压与电流比额定值小得多时，则电气设备将得不到充分地合理使用。

电气设备的额定值通常标在一块小金属牌上，钉在设备的外壳，叫做铭牌。所以额定值又可以叫做铭牌数据。额定值一般用附有下列“e”的符号表示，例如 V_e 表示额定电压， I_e 表示额定电流， P_e 表示额定功率等等。在一般情况下，应该按照铭牌数据来使用设备。例如一个标有220伏、100瓦的灯泡，就是指它的额定电压是220伏，额定功率是100瓦。

七、克希荷夫定律

利用欧姆定律可以计算比较简单的电路。但是，对于较为复杂的电路则不能利用欧姆定律计算。而克希荷夫定律则是对任何电路都有效的电路定律。

我们以图1-7的电路来说明克希荷夫定律的应用。该图是两个电源 E_1 及 E_2 同时供电给一个负载电阻 R 的电路。 r_{01} 及 r_{02} 分别是 E_1 和 E_2 的内阻。

（一）什么是克希荷夫定律

克希荷夫定律有第一定律（节点电流定律）和第二定律（回路电压定律）两个定律。

1. 节点电流定律：

对于电路中任一节点（凡两点之间没有其它分支的电路称为支路，如图1-7中共有ADB、ACB、ARB三条支路。凡三条或三条以上支路的汇合点称为节点，如图1-7中有A、B两个节点），流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。也就是说，流进和流出一个节点的电流的代数总和是等于零的。以式表之为

$$\sum I = 0 \quad (1-12)$$

通常规定流入节点的电流为正，流出节点的电流为负。

2. 回路电压定律：

对于电路中任何一个闭合回路（由一个节点出发，沿着几条支路绕行一周再回到原出发点的电路称为闭合回路，如图1-7中有ACBDA、ACBRA和ADBRA三个回路），回路中的电动势的代数和等于各电阻上电压降的代数和。也就是说，沿此回路所升高的电位必等于沿此回路所降低的电位。以式表之为

$$\sum E = \sum IR = \sum U \quad (1-13)$$

回路的绕行方向是任意选择的。电动势与回路绕行方向一致时取正值。反之取负值。通过电阻的电流与绕行方向一致时，其电阻上的电压降取正值，反之取负值。

（二）利用克希荷夫定律解题的步骤

第一步：选定电流、电动势、电压的方向（已知电流、电动势等按实际方向标定，未知的电流、电动势等的方向可任意标定）标于电路图上和选定回路的绕行方向如图所示。

第二步：根据节点电流定律列出电流方程，如对于节点A，可列出方程

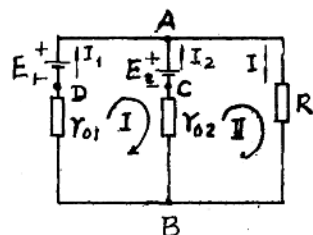


图1-7 说明克希荷夫定律的电路图

$$I_1 + I_2 - I = 0$$

根据回路电压定律列出电压方程，如对于回路I (ACBDA) 列出

$$E_1 - E_2 = I_1 r_{01} - I_2 r_{02}$$

对回路II (ARBCA) 列出

$$E_2 = IR + I_2 r_{02}$$

注意：1. 电路中有 n 个节点只能列出 $n-1$ 个独立方程。如图中有 A、B 两个节点，只能列出一个独立方程。

2. 根据回路电压列方程时，必须使后一个回路比前一个至少包含一条新支路，如图在回路 I 和 II 之后，再按回路 ADBRA 列方程，则此方程不独立，因不含新的支路。

第三步：将已知数值代入以上联立方程并求解。解出的未知电流和电动势等如为正，表示实际方向与假定方向相符。如为负则表示实际方向与假定方向相反。

八、电容器

(一) 电容器和电容

电容器就是储存电荷的容器。凡是用绝缘物质（介质）隔开的两个导体的组合就构成了一个电容器。最简单的平板电容器如图 1-8 所示。

它是由两块同样大小的平行的金属板组成，两板之间充满了介质。两块金属板称为电容器的极板，两极板之间的距离为 d ，极板的长度和宽度比两极间的距离大很多倍。

实际的电容器大都是由两条金属箔（或金属膜）中间隔以空气、纸、云母、塑料薄膜和陶瓷等绝缘物质构成的。这些绝缘物质就称为电容器的介质。

电容器储存电荷的能力用电容器的容量即电容来表示。实验证明：一个电容器接在直流电源上，电容器每一极板上的电荷量 Q 与两极板间的电压 U 成正比。我们把这个比值叫做该电容器的电容。用字母 C 表示即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-14)$$

如 Q 的单位为库， U 的单位为伏，则电容 C 的单位为法 (F)。法是一个很大的单位，生产实际中常用较小的单位微法 (μF) 或皮法 (PF)。 $1 \mu F = 10^{-6} F$ ， $1 PF = 10^{-12} F$ 。

电容是电容器的固有特性，其大小与电容器的极板面积 S 、极板间距离 d 和极板间介质的性质有关，对于平板电容器可用下式计算：

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-15)$$

式中， ϵ 称为介质的电容率或介电常数。如 S 的单位为平方毫米， d 的单位为毫米， C 的单位为皮法，则 ϵ 的单位是皮法/毫米。

真空的电容率以 ϵ_0 表示，

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} = \frac{1}{113} \approx 0.00886 \text{ 皮法/毫米}$$

某种介质的电容率与真空电容率的比值称为该介质的相对电容率，以 ϵ_r 表示。即 $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ 。

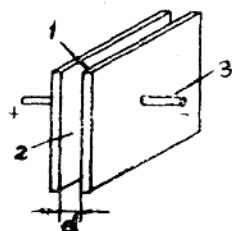


图1-8 平板电容器

1. 极板 2. 绝缘介质
3. 电极

表1-2

几种常用介质的相对电容率

介质名称	ϵ_r	介质名称	ϵ_r	介质名称	ϵ_r
石英	4.2	纯水	80	无线电瓷	6~6.5
空气	1	云母	7	超高频瓷	7~8.5
硬橡胶	3.5	聚苯乙烯	2.2	五氧化二钽	11.6
酒精	35	二氧化二铝	8.5		

几种常用介质的相对电容率见上表 1-2。

电容器中的电介质（即绝缘材料）并不是绝对不导电的。如果施加于电介质的电压太高，电介质内会产生大量的自由电荷，使电介质转变为与它性质相反的导体，这种现象叫做击穿。使电介质开始击穿的电压叫作击穿电压。

电容器的额定工作电压小于击穿电压。在选择电容器时，不仅要注意电容器的容量，还要注意它的额定工作电压。电容器外壳上标明的额定工作电压，通常指的是直流工作电压，如果用在交流电路中，应使交流电压的最大值不超过它的额定工作电压，否则电容器会被击穿。

（二）电容器的充放电

图 1-9 是作电容器充放电的实验电路。

1. 充电

当开关 K 拨向位置 1 时，根据克希荷夫定律，可列出如下方程：

$$E = i_C R + U_C$$

即充电电流 $i_C = \frac{E - U_C}{R}$

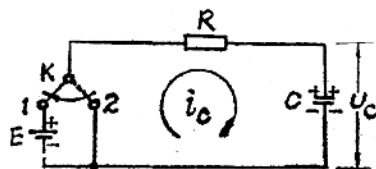


图 1-9 电容器的充放电实验电路

在接通瞬间，由于假设电容器上无电荷，故 $U_C = 0$ ，则 $i_C = \frac{E}{R}$ 为最大。随着充电的进行，

U_C 逐渐升高。 i_C 逐渐减小。经过很长时间， U_C 上升到和 E 相等。 i_C 下降为零，这一过程称为电容器的充电过程。

电流 i_C 和电压 U_C 随时间而变化的规律如图 1-10 的曲线所示。根据推证它的数学表达式为：

$$i_C = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-16)$$

$$U_C = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-17)$$

式中： $\tau = RC$ ，称为电路的时间常数单位是秒(S)。

图 1-10 表明， U_C 一开始升得很快，后来逐渐变慢；通常认为： $t = 3 \sim 5\tau$ ，充电过程

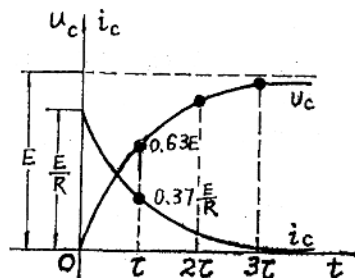


图 1-10 RC 电路的充电曲线

(1-17)

本结束。 τ 值愈大,充电时间愈长(图1-11),这是因为 R 大则初始电流小,充电充得慢, C 大则电量稳定值大,充电过程也较长。

2. 放电

当电容充上电后,将开关拨到2处(见图1-9),则电容将经过电阻 R 放电。这时 E 已断开,电路方程为 $i_c R + U_c = 0$ 。

放电电流 $i_c = -\frac{U_c}{R}$,负号表示放电电流方向与充电电流方向相反,在放电开始瞬间,由于电容电压 U_c 等于 E ,所以放电电流 $i_c = -\frac{U_c}{R} = -\frac{E}{R}$ 为最大。随着放电的进行,电容器中积

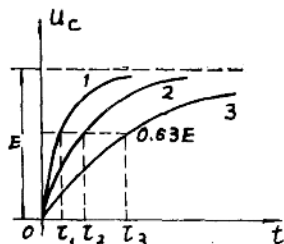


图1-11 τ 值对充电过程的影响

累的电荷减小。端电压 U_c 降低,放电电流 i_c 减小。最后,电容两极板的电荷放完, U_c 等于零。放电电流 i_c 也等于零。这一过程称为电容器的放电过程。 i_c 和 U_c 随时间而变化的规律如图1-12的曲线所示。它的数学表达式则为:

$$i_c = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-17)$$

$$U_c = E e^{-\frac{t}{RC}} = E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-18)$$

式中的时间常数 $\tau = RC$,即等于放电回路中电阻与电容的乘积,它决定放电时电压和电流的衰减速度, τ 大则慢, τ 小则快。

通过充放电过程可以看出:

1. 在开关闭合的瞬间,电容的端电压保持不变。即如果开关合上前,电容端电压为零,则开关合上瞬间电容的端电压也为零,即电容器相当于短路;如果开关合上前电容端电压为 U_c ,则在开关合上的瞬间电容电压仍为 U_c ,这说明电容器两端的电压是不能突变的。

2. 电容器在充电结束后(充电电流为零),相当于开路,即有所谓“隔直”(隔离直流)的作用。

(三) 电容器的并联和串联:

实际应用中如果遇到单个电容器的容量不够,就需要用并联的方法来增加容量,如果遇到单个电容器的额定工作电压不够高时,就需要用串联的方法使之满足工作电压的需要。

1. 并联

电容器并联时,总电容(等效电容) C 等于各分电容之和,即

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (1-19)$$

电容器并联时,总电容比每一个电容都大。

2. 串联

电容器串联时,总电容 C 的倒数等于各分电容的倒数之和,即

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (1-20)$$

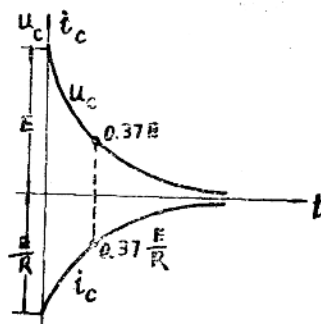


图1-12 RC电路放电时 U_c 和 i_c 的变化曲线

电容器串联时，总电容比每一个电容器的电容都小，但这个电容器组的耐压却提高了。

九、静电

(一) 电场和电场强度

前面讲到，电荷作定向运动就形成了电流。但在另一种情况下，例如摩擦生电或充电的电容器，其中的电荷处于相对平衡状态，这种状态称为静电。其周围具有电力作用的空间，称为静电场。

如果把一个只带微小电量的电荷放到电场中去，则电荷将受到电场力的作用。实验证明：电荷在电场内某一点所受电场力的大小与电荷的电量 Q 成正比，而同一电荷在电场内各点所受力又各不相同。可见，电荷在电场内某一点所受到的电场力，不仅与该电荷的电量 Q 成正比，还与该点的电场的强弱成正比。如以电荷所受的力和电荷所带电量之比，作为描述该点电场强弱的物理量，则称为电场强度，即：

$$E = \frac{F}{Q} \quad (1-21)$$

式中： E ——电场强度、单位为牛顿/库伦，

F ——电场力、单位牛顿，

Q ——电荷、单位库伦。

(二) 电容器中的电场能

电容器充电以后，在极板上聚集了电荷，两个极板上的正、负电荷就在介质中建立了电场。电场中储存着电场能，电场能的多少和电容量 C 的大小、电容器两端电压 U_c 的大小有关。电容量愈大，电压愈高，电场能愈多。理论分析和实验证明，充电电容器中储存的电场能可以用下式表示：

$$W_c = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (1-22)$$

式中： W_c ——电容器中储存的电场能，单位焦，

C ——电容器的电容量，单位法，

U_c ——电容器的电压，单位伏。

电容器的充电就是把电源输送的电场能储存起来，而放电则是把这部分能量释放出来，转换为其它形式的能量。

(三) 静电场的应用

工业上应用静电场的例子很多，现举静电屏蔽加以说明。至于利用电容器放电时所释放的能量在机械工业中用作电火花加工则可以加工出具有复杂几何形状的小孔。

1. 静电屏蔽

比较精密的电子仪器都要放在金属壳内，晶体管都要用金属外壳罩起来，这些措施是为了隔离外部电场对仪器设备的影响。金属的这种作用叫屏蔽作用。

金属之所以有屏蔽作用，是因为金属内的自由电子在外电场的作用下，将逆着外电场的

方向运动，而这就在金属内部形成了一个附加电场，其方向与外电场相反，使金属内部的电场强度减弱。只要金属内部的电场强度还没有减小到零，自由电子就会继续移动，使附加电场增强，金属内部的电场削弱，直到消失为止。这样就好象外电场不能穿过金属，使金属壳内的仪器设备得到了屏蔽。

2. 电火花加工

电火花加工是利用电容器放电时的火花来加工硬金属的一种方法。由于电容器的放电火花会产生电子流的冲击，并且具有高温熔化作用，因此能在硬金属上加工出具有复杂几何形状的小孔。图1-13是电火花加工的原理示意图，工具电极和加工工件一起放在液体介质（如煤油）中，当电容器的充电电压高到能使工件与电极间介质的绝缘被击穿时，就产生火花放电，电子从电极冲向工件，经过多次火花放电后，工件上正对电极处就出现小孔，它的形状和电极形状相似。电阻 R 用来控制充电速度，也就是控制火花的频率。

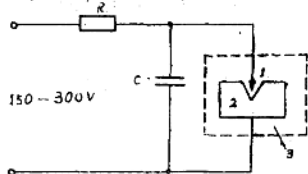


图1-13 电火花加工原理示意图

1. 电极 2. 工件 3. 油槽

第二节 电磁基本知识及应用

早在两千多年以前，我国就发现了天然的磁铁矿(Fe_3O_4)，知道磁能吸铁。而且最早发明指南针，指南针就是一个小型的针形磁铁。指南针的发明对古代航海事业起过很大的作用。

天然磁铁磁性很弱，现代工业上大都使用人造磁铁。它是用钢铁和铬、钨、钴、镍等金属制成的，可以做条形、针形和马蹄形等形状。

磁铁具有以下性质：

1. 磁极：如果将条形磁铁放入铁屑，取出时可以发现，靠近磁铁两端的地方吸引的铁屑特别多，也就是磁性特别强。我们称磁性特别强的两端为磁极。

2. 南极和北极：将条形磁铁或狭长磁针的中心支持或悬挂起来，使它能在水平面上自由转动，静止后，两磁极总是一端指向南方，一端指向北方。我们把指南的一端叫做南极，以S表示；指北的一端叫做北极，以N表示。

磁针会指南北是由于受到地磁的作用。地球是一个很大的磁体，地磁的南极接近地球的北极，地磁的北极则接近地球的南极。指南针就是根据这个原理制成的。

磁铁的磁极总是成对地存在，没有只包含单一磁极的磁铁。

3. 同性磁极相互排斥、异性磁极相互吸引：两个磁铁相互靠近时，如果N极与N极（或S极与S极）接近，则有相互排斥的作用力；如果S极与N极接近，则有相互吸引的作用力。

4. 磁化：如果将一永久磁铁靠近一根原来没有磁性的铁棒（或钢、钴、镍等金属），则铁棒也会显示出磁性，这种现象叫做铁磁物质的磁化。被磁化的铁棒实际上也成为磁铁。磁铁吸引铁屑或铁块，就可以通过磁化作用加以解释。

为什么两个互相不接触的磁铁，在它们之间会有作用力呢？这是因为在磁铁的周围存在着磁场。磁场的存在可以通过实验来证明：

在条形磁铁上放一块玻璃或纸板，再撒上一些铁屑，铁屑就有规则地排成图1-14(a)所

示的线条。铁屑并没有和磁铁直接接触，为什么能作有规则的排列呢？这是因为这些铁屑受到了磁铁周围磁场的作用力的缘故。铁屑便沿着磁场作用力的方向“磁力线”排列起来，也就构成了一个磁场图形。图1-14(b) 就是马蹄形磁铁的磁力线分布情况。

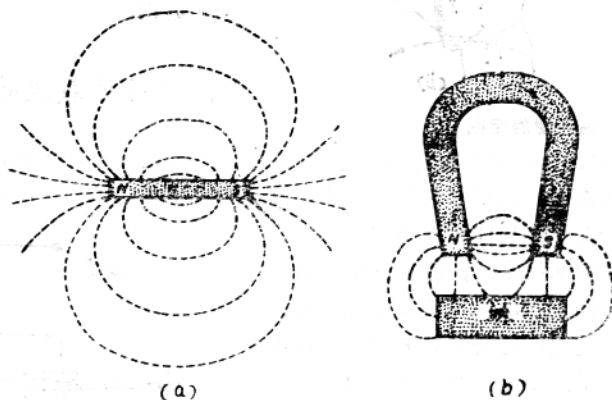


图1-14 磁铁的磁场

(a) 条形磁铁的磁场

(b) 马蹄形磁铁和一块衔铁间的磁力线

一、电流的磁场——右手螺旋定则

实验发现除磁铁外载电流导体的周围也存在着磁场。磁场的强弱可以用磁力线表示，磁力线的稀密可以代表磁场的强弱，磁力线的方向可以代表磁场的方向，如图1-15所示。图1-15(a)及(b)分别表明通有电流的长直导线和螺线管周围的磁场。图中 I 为电流， Φ 为磁力线(磁通)。

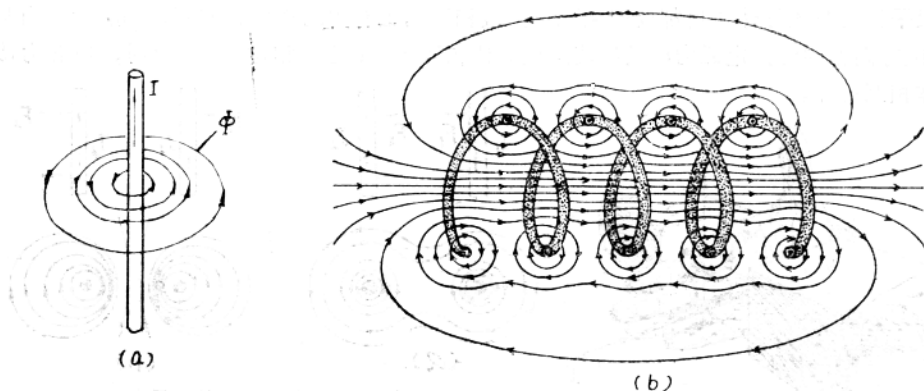


图1-15 电流的磁场

(a) 载流长直导线周围的磁力线

(b) 载流螺线管周围的磁力线

电流磁场的方向可用右手螺旋定则判定。

对于载流长直导线，用右手伸直的大拇指顺着直导线中电流的方向，那末弯曲的四指就表示出磁力线回转的方向(图1-16a)；对于载流螺线管线圈。用右手弯曲的四指沿着电流回转的方向，那末伸直的大拇指就表示螺线管内部磁力线的方向(图1-16b)。这就是判定电流