

电 工 及

动态测试常用仪器的使用

上海机械学院 射流专业
气压传动技术训练班

1975.12.

前 言

在发展和推广“气压传动技术”中，在“气动元件”设计及其在工业自动化应用过程中都要涉及一些有关电方面的知识，如气—电转换，电磁气阀，电磁线圈设计，元件动态性能的非电量电测法及其有关电工、电子仪器的使用，采用电磁气阀控制系统继电控制线路等等，因此对从事“气压传动技术”工作人员来说，熟悉一下有关电的知识也是很必要的。

本讲义主要是根据“气压传动技术”训练班的需要而编写的，内容包括电工基础知识及动态测试常用仪器使用说明两部分。第一、三章是有关直流、交流基本知识，第二章是为配合电磁线圈的设计，介绍了有关电磁感应及磁路计算的内容，第四章是满足应用（特别是电磁气阀系统）需要，介绍了电器基本元件及基本继电线路，第五章是介绍几种常用动态测试仪器的使用说明。

在教学过程中，可以根据学员实际情况及需要，有重点的介绍，部分内容可以通过自学解决。

由于时间仓促，又缺乏经验，一定会有错误，不当之处，望同志们指正。

目 录

第一章 直流电路	1—1
§ 1—1 电流的形式及其基本概念	1—3
§ 1—2 电阻的串联、并联和混联	1—15
§ 1—3 基尔霍夫定律	1—20
第二章 磁路	2—1
§ 2—1 磁的基本知识	2—1
§ 2—2 电磁感应	2—3
§ 2—3 磁路概念	2—7
§ 2—4 磁动势与磁场强度	2—8
§ 2—5 磁化曲线	2—9
§ 2—6 磁路损耗——磁滞及涡流	2—11
§ 2—7 磁路对称	2—13
第三章 单相正弦交流电路	3—1
§ 3—1 正弦交流电的产生	3—1
§ 3—2 正弦交流电的三个基本物理量	3—3
§ 3—3 正弦量的矢量表示法	3—8
§ 3—4 纯电阻交流电路	3—11
§ 3—5 纯电感的交流电路	3—13
§ 3—6 纯电容交流电路	3—17
§ 3—7 交流电路的功率	3—25

第四章 常用电器元件及控制电路	4-1
§4-1 常用电器元件	4-1
§4-2 常用继电器控制单元线路	4-11
§4-3 线路举例	4-16

第五章 动态测试常用仪器使用方法	5-1
§5-1 XFD-8型超低频讯号发生器技术说明	5-1
§5-2 示波器	5-6
§5-2-1 SBD-6型超低频双线示波器技术说明	5-6
§5-2-2 SC-16型光线示波仪使用说明	5-22
§5-2-3 FF-3型分流及附加电阻箱使用说明	5-41
§5-3 Y6D-3A型动态电阻应变仪使用说明	5-48

第一章 直流电路

我们知道，电灯发光，电烙铁发热，是因为这些元件有电流通过。打开收音机能听到新闻、音乐等广播节目，也是借助于电流的作用。工业生产中，强大的电机，鼓风机能转动，加热电炉能熔炼钢铁等等都要借助电流的作用。总之，电是工农业生产 and 人类生活中不可缺少的东西。在社会主义革命和建设中起着十分重要的作用。

“电”到底是什么呢？它是怎样得来的呢？

根据电子学说的材料，自然界的一切物质，都是由许多叫做分子的微粒组成的。分子又由原子组成，原子又由一个原子核和以很高的速率在它周围旋转着的电子组成。原子核带有正电荷（用符号“+”表示）电子则带有负电荷（用符号“-”表示）。原子非常微小，在一毫米的长度上可以排下一亿个原子，原子核的直径只相当于原子的几分之一。每一物质中都有等量的正电荷和负电荷，它是互相吸引着的。假如要从一物质中取出一些电子，就必须设法克服正电荷和负电荷之间的吸引力。例如我们用丝绸物摩擦玻璃棒，就是迫使玻璃棒原子中的一部分电子，转移到丝绸物上，这样，玻璃棒上少了电子，正电荷便多出来了，丝绸物上多了电子，负电荷便多起来了，因而，丝绸物带负电而玻璃棒带正电（图1-1）



图1-1

用毛絨擦硬橡膠時，就發現毛絨帶正電而硬橡膠棒帶負電。又膠木鋼筆杆在絨線衫上摩擦幾次，就可以把紙屑吸起，這都是摩擦起電的現象。

電荷的單位叫“庫倫”，每庫倫的電量含有 6.25×10^{18} 個電子。

電荷聚集不動時，這種狀態稱為靜電。如果電荷在運動狀態。就稱為動電。也就是我們討論的中心。

一切金屬的原子有着不穩固的外圍電子，這些電子受到外力的作用時容易離開自己的軌道。是導電性能很好的物體，稱為導體。各種金屬、碳、鹽類、酸類、碱類的溶液以及潮濕的土地，都屬于這類。還有其他許多物質的原子，把電子牢固地吸在原子核周圍，不容易讓它們自由地離開，這是導電性能不良的物體。稱為非導體或絕緣體，絕緣體是有一條件的，在低壓應用到絕緣體，用在高壓下就變成導體了，所以絕緣體都有一個工作限度，叫做絕緣強度。在正常狀態下的各種氣體、很多種液体以及除了金屬和碳以外的大部分固體都屬于不良導體。如橡膠、玻璃、塑料、木材、絲、瓷、變壓器油等都可以作為絕緣體。

毛主席在“矛盾論”中指出：“就人類認識運動的秩序說來，總是由認識了個別和特殊的事物，逐步地擴大到認識一般的事物。人們總是首先認識了許多不同事物的特殊本質，然後才有可能更進一步地進行概括工作，認識諸般事物的共同的本質。當着人們已經認識了這種共同的本質以後，就以這種共同的認識為指導，繼續地向着尚未研究過的或者尚未深入地研究過的各種具體的事物進行研究，找出其特殊的本質，這樣才可以補充、豐富和發展這種共同的本質的認識，而使這種共同的本質的認識不致變成枯槁的僵死的東西。這是兩個認識過程：一個是由特殊到一般，一個是由一般到特殊。”我們遵照毛主席

带的教导，先从比较简单的直流电路讨论起从中得出一些规律性的东西，再用这些规律性的东西来分析、指导其他电路。

§ 1-1 基本概念

1. 电流

电流是怎样一回事呢？带电质点作有秩序的运动这就叫电流。如导体中的自由电子在电场力的作用下从A向B作定向运动（图1—2），这段导体里就有了电流。所以电流是带电质点的一种特殊运动形式。这种运动形式虽然不能用肉眼看到，但可通过它客观上产生的效果而检验到它的存在，如导体里有电流通过，它将使导体发热而引起温度升高，这所谓电流的热效应，电灯、电烙铁就是利用电流的热效应制成的；导体有电流通过，在导体周围有磁场存在，这所谓电流的磁效应，利用电流的磁效应，工业上制成了电流表来检测电流的存在，有些工业部门利用电流的这一特点制成电磁铁帮助我们工作。

在导体内可以是由于负电荷作有秩序的运动而形成电流（如金属导体）；也可以是正电荷作有秩序的运动而形成电流（如电解液内就有正电荷运动形成电流），但负电荷形成的电

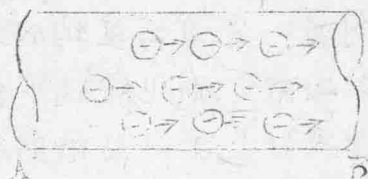
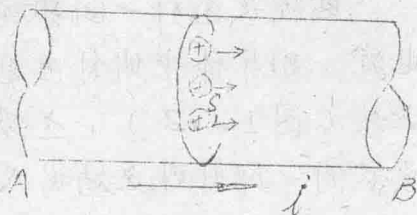


图 1-2

流，对于客观上产生的效果，完全可以用一正电荷形成的电流等效代替。如图1—2中的负电荷换上等量的正电荷，并使它在相同的情况下，从B到A作定向运动，则此正电荷形成的电流在客观上产生的热效应和磁效应完全与负电荷形成的电流一样，为了避免区别正电荷电流与负电荷电流的复杂情况，历史上讲电流都是指等效正电荷电流，图1—2中带负电的电子流是从A到B，但习惯上讲的电流是指等效的正电荷电流，因此

方向是B流向A的。以后所用电流概念都是指正电荷形成的电流。

为了定量研究电流的大小，我们规定了电流强度这一电量，习惯上用字母*i*来表示它。下面用图1-3来说明电流强度的概念。导体中的电流强度*i*等于在一小段时间 Δt 内，从某一截面*S*的一方穿过到另一方的电荷的代数总和 Δq 与该一小段时间之比。写成数学式即：



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

图 1-3

如果小段时间 Δt 取得很短，以致趋近于0，就可写成微分形式：

$$i = \frac{dq}{dt}$$

(1-1)

所以电流强度在数值上等于单位时间内从导体某一截面的一侧一方穿过到另一方电荷量的代数总和。如果电荷量*q*的单位用库仑，时间*t*用秒，则电流的单位是安培，简称为A。在测量较小的电流强度时，可取安培的千分之一作为电流强度的单位，叫作毫安，简写mA，如电流更小用安培的百分之一作为电流强度的单位，叫作微安，简写 μA ，这三个电流强度单位的换算关系如下：

$$1 \text{ 安培} = \frac{1000}{1} \text{ 毫安} = \frac{1000000}{1} \text{ 微安}$$

$$1 \text{ 微安} = \frac{1}{1000} \text{ 毫安} = \frac{1}{1000000} \text{ 安培}$$

如果电流强度不随时间变动，在同样的时间间隔内穿过任意截面的电荷量都相等，则这种电流叫恒定电流，简称直流，在这种情况下电流强度用大写字母*I*表示，则有，

$$I = \frac{q}{t}$$

式中 q 为在时间 t 内穿过导体任意截面的电荷量。由于电流强度在电工技术中极为常用，所以一直被简称为电流，这样电流不仅表示一种现象而且还代表了一个电量。

上面已讲过，电流有强有弱，可以用安培的多少来表示，但电流不仅有大小，它还有导体流动还有一个可能则流动方向，在研究过程中，我们必须将它表示清楚。为此在导体旁过划一竖心线头，称为电流的正方向，当电流顺着箭头方向流动，电流取正值，若相反电流取负值。采用了电流的正方向和代数中的正负号，就可以将电流的大小和方向表示清楚，这里须指出一点电流的正方向是可以任意选择的，它只是表示电流流向的一个工具，并不会因正方向选择的不同而影响电流的实际流向，如图 1-3 中，电流的实际流向是从 A 流向 B，若如图中选择正方向则电流应取正值，若将电流的正方向反一个方向，则电流应取负值。由上面的叙述可知正负号是与一定的正方向所取联系的，离开了正方向谈电流的正负号是没有意义的。在计算电路的时候，假使将不知道电流时，首先要假设电流的正方向，然后按假设的电流正方向计算，待求出结果后，将这些电流的符号与正方向比较，就可确定电流实际上的流动方向。

2. 电阻：

世界上任何事物都是“一分为二”的，导体也是如此，一方面它具有导电的能力，另一方面又对阻碍电流通过的作用。这种阻碍作用，称为导体的“电阻”，电阻的单位是“欧姆”，简称“欧”，用符号“ Ω ”表示，此外还有千欧（ $K\Omega$ ），兆欧（ $M\Omega$ ）等，它们的关系是：

$$1 \text{ 千欧} = 1000 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 1000000 \text{ 欧}$$

导体电阻的大小与哪些因素有关呢？不同则导体其电阻大小不同，如铜的电阻较小，铁的电阻就较大一些，铅更大，而

铁还要大。

同一材料导体电阻值与导体尺寸有很大关系，凡是越长，越长的导体电阻就越大，反之，凡是越粗越短的导体其电阻就越小。

既然各种导体的电阻与材料尺寸有关，因此若要比较各种材料导体电阻值大小，导体的长度和截面都要相等，这样才能判明什么材料导电性能好，什么材料差。我们取导体的长度为1米，截面积为1平方毫米作为标准进行比较。这种尺寸导体，其电阻值就称为该导体的电阻系数。（或称电阻率），用字母“ ρ ”表示，单位是欧·毫米²/米。

导体电阻可利用下面的公式进行计算：

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

式中：

R = 导体电阻，欧；

ρ = 导体电阻系数，欧·毫米²/米；

l = 导体长度，米；

S = 导体截面，毫米²。

公式(1-2)的含义是：导体的电阻等于这个导体的电阻系数乘上它的长度，并除以它的截面。

几种常用材料的电阻系数列于表1-1之中。

表 1-1 几种常用材料的电阻系数

材料名称	电阻系数(欧毫米 ² /米)
银	0.0162
铜	0.0169
铝	0.0262
锡	0.0548
铁	0.0978
铅	0.222

例1. 有一铝线，其截面为 2.5毫米^2 ，长度为 2000米 ，求它的电阻值。

解：按公式1-2进行计算，从表1-1中查得铝的电阻系数 $\rho = 0.0262$ ，所以：

$$R = \rho \frac{l}{S} \\ = 0.0262 \cdot \frac{2000}{2.5} = 20.9 \text{ 欧}$$

例2. 一根铁线，已知它的电阻为 6.5欧 ，截面积为 4毫米^2 ，问这根导线的长度是多少。

解：由表1-1查得铁的电阻系数为 $\rho = 0.0978$ ，按公式1-2进行计算，因为

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

所以：

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{6.5 \times 4}{0.0978} = 266 \text{ 米}$$

电阻的倒数

$$g = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l} = r \cdot \frac{S}{l}$$

称为电导，而 $r = \frac{1}{\rho}$ 称为电导率，电导的单位用“姆”表示，电阻和电导成反比，电阻小的导线有着大的电导。

导体的电阻，除了和导体的材料尺寸有关外，还与导体的温度也有关系，普通金属材料，当温度上升时，电阻就增长，温度下降时，电阻就减小。不同的材料，其电阻受温度的影响是不一样的，当温度变化时，有的材料电阻变化较大，有的材料就很小。

各种材料的电阻与温度的关系可按下式表示：

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha (t - t_0) \quad (1-3)$$

式中： R_t —温度为 t 时导体的电阻，欧；

R_0 —温度为 t_0 时导体的电阻，欧；

α — 电阻温度系数，它的意义是：1 欧电阻温度升高 1 度电阻变化量。

这个公式 (1-3) 很有用，当导体温度变化后如果知道温度，就可以求出它的电阻；如果测出电阻就可以求出它的温度。

表 1-2 是几种常用材料的电阻温度系数，应该指出电阻温度系数愈小，电阻愈稳定。

表 1-2 几种常用材料的电阻温度系数

材料名称	电阻温度系数 α
银	0.0036
铜	0.0040
铂	0.0042
钨	0.0052
铁	0.0057
铝	0.0041

例 3，有一电动机，在 20°C 时其磁场线圈（铜导线）的电阻为 100 欧，运行一段时间后，测得电阻为 120 欧，问此时线圈的温度是多少？

解： $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$

$R_0 = 100 \text{ 欧}$

由表 1-2 查得铜的电阻温度系数

$\alpha = 0.0042$

将这些数据代入公式 (1-3) 进行计算

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha (t - t_0)$$

$$120 = 100 + 100 \times 0.0042 (t - 20)$$

求得：

$$t = 70^{\circ}\text{C}$$

因此可知该线圈的温度已高到 70°C 了。

3. 电压、电位和电动势：

水从高处往低处流，是因为高处侧水有压力，两处侧水有了压力差，水就流动。形成水流。这两处侧压力差就称为水位差。同样在电路里如果两处有电位差，当用导线连通时，在导线里就有电流流动。在图1-4中，A和B是两电极，A带正电荷，B带负电荷，如果我们用一小灯泡将A、B两极连接起来，据电荷相互作用的原理（即同性电荷相斥，异性电荷相吸），可知，正电荷就要从电极A流向B，于是电路中就形成电流。

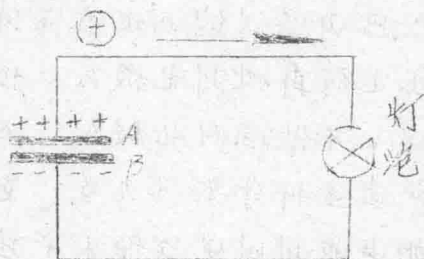


图1-4

电荷流经电路就要作功，在图1-4中就表现为小灯泡发光，这是由于电极A上带正电荷，使A点有较高的电位能，而电极B上带负电荷使B点有较低的电位能，电位有高低，就使正电荷沿自电从A流到B，流经电路时，把电位能转换成热能的形式交给了电路。因而使灯泡发光，A、B两点间的电位差值越大，表示正电荷具有的电位能越高，在移动时做的功也就越多，因此我们用正电荷移动时作功的多少来衡量A、B两点间的电位差值的大小。

我们把单位正电荷从A点移到B点所做的功，称为A、B两点间的电压，或称为A、B两点间的电位差。用公式表示：

$$\frac{W}{Q} = U_{AB} = U_A - U_B \quad (1-4)$$

式中：W为正电荷Q从A点移到B点所作的功；

U_{AB} 为A、B两点的电压

U_A, U_B 为A点和B点的电位。

电压的方向规定为由高电位指向低电位。

我们从图1-4分析中知道，正电荷从高电位向低电位移动，这样电极A由于正电荷的减少而使电位逐渐降低，电极B上因正电荷的增多而使电位逐渐增高，其结果是使A、B两电极间的电位差逐渐减小到零。与此同时，电路中的电流也相应地减小到零。

若要维持电流不断地在电路中流动，并保持一定，即必须使A、B两电极间的电位差保持一定，也就是说要使电极B上所增加的正电荷再回到电极A，但由于受到电极A上的正电荷的排斥作用，不能回到电极A，因此必须借助于外部的力量。电源就能产生这种外部的力量，它是把非电能转换成电能的装置。例如电池利用化学能来产生这种外部的力量，克服电极A上正电荷的排斥力，把电极B上所增加的正电荷移到电极A上去。在此过程中，电源的外部力量克服排斥力而移动正电荷是要做功的，为了衡量电流做功的能力，我们把电源移动单位正电荷从低电位点B到高电位点A所作之功称为电源的电功，用公式表示则为：

$$E = \frac{W}{Q} \quad (1-5)$$

式中：E为电源的电动势

W为电源移动正电荷Q从B点到A点所作之功。

电动势的方向，规定为在电源内部由低电位指向高电位，也就是电位升高的方向。

电压的单位是“伏”，用符号“V”表示；伏的含义是：1库仑的电量从一点移到另一点所作的功是1焦耳时，两点间的电压为1伏。此外，在计量微小的电压时，还有毫伏(mV)或微伏(μV)等单位，其换算关系为：

$$1 \text{ 伏} = 1000 \text{ 毫伏}$$

$$1 \text{ 毫伏} = 1000 \text{ 微伏}$$

在测量高电压时则用千伏(KV)表示。

1千伏 = 1000伏

电功单位也使用伏表示。

4. 欧姆定律:

毛主席教导我们:“一切客观事物的本来联系互相联系的和其有内部规律的”。电路里的电流,电阻和电压三者也是互相联系着的且符合着一定的规律的。

毛主席又教导我们:“无论何人要认识什么事物,除了同那个事物接触,即生活于(实践于)那个事物的环境中,是没有法子解决它的。”下面我们通过实验来看一下电阻、电流、电压三者之间有些什么关系。

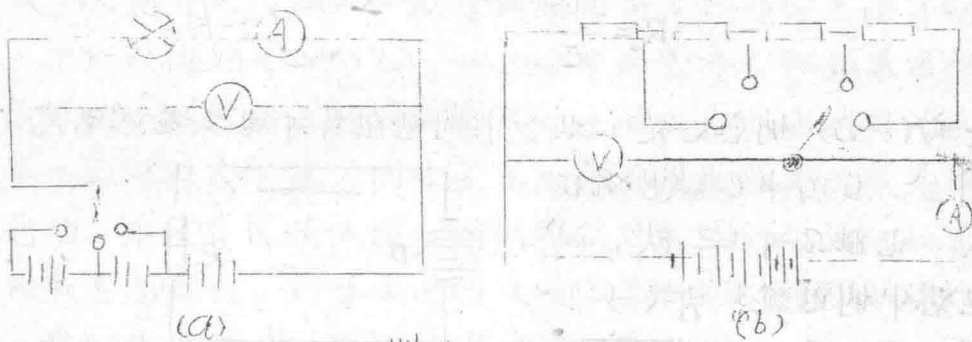


图 1-5

在图 1-5(a) 的电路中,如果保持电阻不变(用同一盏灯泡)电压增高则电路中电流跟随电压成比例地增加,反之电压减低电流亦随电压成比例地减小。

在图 1-5(b) 的电路中,如果保持电压不变,将电阻增加,则电流随电阻增加而反比例地减小,反之,若电阻减小,则电流随电阻减小而反比例地增加。

这里的电压,电流和电阻三者之间的关系,可用公式表示如下:

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

公式(1-6)这个关系很重要，称为“欧姆定律”，在今后电路计算中要经常用到它。

从公式(1-6)可以得到：若电阻很小，甚至接近于零，那么，电流将很大；若电阻很大，甚至可当作无穷大，那么通过的电流将极其微小，可当作零。

公式(1-6)可以改写成如下形式：

$$U = IR \quad (1-7)$$

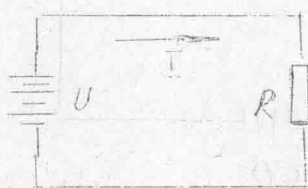
公式(1-7)的意义是：电路中的电压 U 等于电流 I 与电阻 R 的乘积。

公式(1-6)还可以改写成另一形式：

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-8)$$

公式(1-8)的意义是：电路中的电阻等于电压除以电流。

例1. 右图中已知电压 U 为60伏，电阻 R 为12欧，问通过电路中的电流 I 为多少？



解：按公式(1-6)进行计算。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{12} = 5 \text{ (安)}$$

例2. 要使6欧姆的电阻中通过20安的电流，须加多大的电压。

解：按公式(1-7)计算。

$$U = IR = 20 \times 6 = 120 \text{ (伏)}$$

例3. 一只线圈接在110伏的电源上，测得通过的电流为0.2安求该线圈的电阻。

解：按公式(1-8)计算：

$$R = \frac{U}{I} = \frac{110}{0.2} = 550 \text{ (欧)}$$

5. 电功率

一个皮球在地上静止不动，如果要这个球运动就必须用力踢这个球，它才会由静而动。把水桶拿到桌子上，我们也必须用力，用了力就做了功。东西越重，我们用的力也要愈大，做的功也就愈大。因此做的功的大小与作用力成正比。东西搬得越高，做的功也就愈大。可见做的功的大小又与距离成正比，所以：

$$\text{功} = \text{力} \times \text{距离}$$

例如要把20公斤的铁箱，搬到4米高的架子上；那末所做的功为 $20 \times 4 = 80$ 公斤一米。

由功的意义可以知道，功与时间是没有关系的，例如我们用一个人用力来移动200公斤的物体需要20分钟才能升高100米，他所做的功是 $200 \times 100 = 20000$ 公斤一米。但如果用机器来升高该物体则只要2秒钟就能了。这时机器做的功也是 $200 \times 100 = 20000$ 公斤一米。因此这只能说明机器与人做了同样大小的功，而没有说明快慢，所以就没有比较的意义，如果将时间因素考虑进去，用单位时间里做了多少功，就可以进行比较了，我们称单位时间里所做的功叫功率。因此：

$$\text{功率} = \frac{\text{功}}{\text{时间}}$$

这样，例中人的功率是 $\frac{20000}{20 \times 60} = 16.6$ 公斤米/秒

机器的功率为 $\frac{20000}{2} = 10000$ 公斤一米/秒

可见机器的功率比人的功率大得多。

水流高水低的地方流动时也会做功，水量越多所做的功越大；水落差越高，所做的功也越大，并且都成正比关系。因此，水流所做的功为水量乘以水落差，水流在单位时间内所做的功就是水功率。同样，电从高电位向低电位流动时，