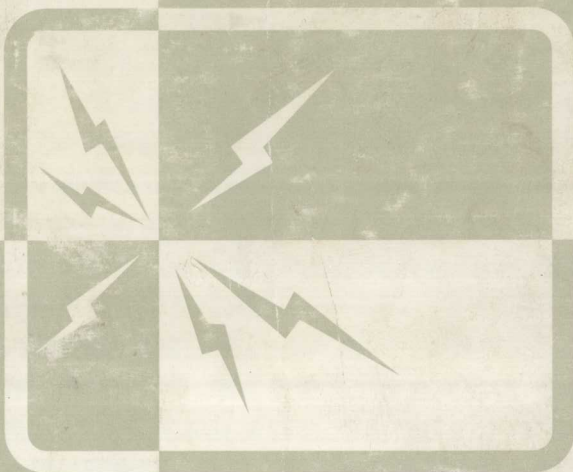




特种作业人员培训教材

# 电工作业安全技术



河南省劳动保护宣传教育中心

TM3  
328

## 第一章 电工基础知识

### § 1 电的基本概念

#### 一、电荷的电场

失去电子或得到电子的物体就带有正电荷或负电荷。带有电荷的物体称为带电体。在电荷的周围存在着电场。引进电场中的电荷将受到电场力的作用。

电场强度和电位是表征静电场中各点性质的两个基本物理量。电场中某点的电场强度即是单位正电荷的该点所受到的作用力。电场强度的单位是  $V/m$ 。电场中某点的电位是指在电场中将单位正电荷从该点移至电位参考点的电场力所做的功。电位的常用单位是  $V$  或  $mV$ ,  $1V=1000mV$ 。电场中某两点之间的电位差称为这两点之间的电压或电压降。电压的单位与电位的单位相同。

#### 二、电流和电路

在电源的作用下,带电微粒会发生定向移动,正电荷向电源负极、负电荷向电源正极移动。带电微粒的定向移动就是电流。一般以正电荷移动的方向为电流的正方向。电流的方向和大小不随时间变化的电流称为直电流。电流的大小和方向随时间作周期性变化的电流称为交流电。

电流的大小称为电流强度。电流强度简称为电流。电流

的常用单位是 A 或 mA,  $1A=1000mA$ 。

电流所流经的路径即电路。在闭合电路中,实现电能的传递和转换。电路由电源、连接导线、开关电器、负载及其它辅助设备组成。电源是提供电能的设备。电源的功能是把非电能转换为电能,如电池把化学能转换为电能,发电机把机械能转换为电能等。干电池、蓄电池、发电机等是最常用的电源。负载是电路中消耗电能的设备。负载的功能是把电能转变为其它形式的能量。如电炉把电能转变为热能,电动机把电能转变为机械能等。照明器具、家用电器、机床等是最常见的负载。开关电器是负载的控制设备,如刀开关、断路器、电磁开关、减压起动器等都属于开关电器。辅助设备包括各种继电器、熔断器以及测量仪表等。辅助设备用于实现对电路的控制、分配、保护及测量。连接导线把电源、负载和其它设备连接成一个闭合回路,连接导线的作用是传输电能或传送电讯号。

为便于分析实际电路,通常用符号表示组成电路的实际元件、器件及其连接导线,即画出电路图。图 1—1(a)是最简单电路的实物接线图,图 1—1(b)是与其相应的电路图。

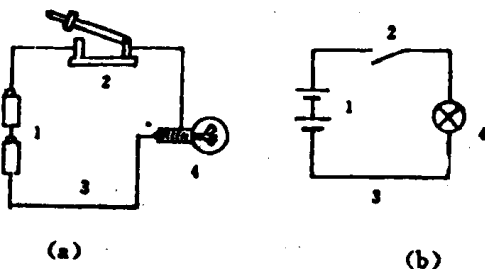


图 1—1 简单电路

1—电源;2—开关;3—连接导线;4—负载

### 三、电阻、导体和绝缘体

### 1. 电阻

当电流通过导体时,由于自由电子在运动中不断与导体内的原子、分子发生碰撞,就会受到一定的阻力。导体对电流的这种阻力叫做电阻,用  $R$  表示。

电阻的单位是欧姆,用欧( $\Omega$ )表示。大电阻常用千欧( $k\Omega$ )或兆欧( $M\Omega$ )做单位。它们的换算关系如下:

$$1 \text{ 千欧} = 1000 \text{ 欧} = 10^3 \text{ 欧}$$

$$1 \text{ 兆欧} = 1000 \text{ 千欧} = 10^6 \text{ 欧}$$

### 2. 电阻的计算

导体存在电阻是一个客观现象,那么导体电阻的大小与哪些因素有关呢? 实验证明,导体电阻与导体长度成正比,与导体截面积成反比,还与导体的材料有关。

$$\text{即} \quad R = \rho \frac{L}{S}$$

式中  $R$ ——导体电阻(欧);

$L$ ——导体长度(米);

$S$ ——导体截面(米<sup>2</sup>);

$\rho$ ——电阻率(欧米)。

电阻率  $\rho$  表示长度为 1 米,截面是 1 平方米的导体所具有的电阻值。不同材料有不同的电阻率,几种常用电工材料在 20℃ 时的电阻率可由表 1—1 查得。

由表 1—1 可见,银、铜、铝的电阻率较小,它们都具有良好的导电性能。由于银较贵重,不宜大量使用,因此应用较广泛的导电材料是铜和铝。如高压输电线大都采用钢芯铝绞线。

### 3. 电导

导体对于电流有一定的阻力,同时导体也具有传导电流

的能力。电导就是用来表示导体传导电流能力大小的参数。

表 1-1 几种常用材料的电阻率

材 料	电 阻 率 (欧米)	材 料	电 阻 率 (欧米)
银	$0.0165 \times 10^{-6}$	钨	$0.055 \times 10^{-6}$
铜	$0.0175 \times 10^{-6}$	镍铬合金	$1.5 \times 10^{-6}$
铝	$0.0283 \times 10^{-6}$	硬橡胶	$1 \times 10^{16}$

一根导线如具有电阻越大,其传导电流的能力就越差,即说明电导就越小。反之如导体的电阻越小,则电导就越大。故可知电导与电阻互成倒数关系。电导用  $G$  表示,即

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位为西门子,简称西(S)

电阻和电导都是用来表示物体导电性能的参数,在实际应用上可取其中一种。

#### 4. 导体和绝缘体

物体按其导电性能大致可分为导体、绝缘体和半导体三类,各种材料的导电性能可以用电阻率或电导率表示。

导体具有良好的导电性能,即是电导率大,电阻率小的材料。导体材料的电阻率一般在  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  范围内,金属材料大部分为良导体。如银、铜和铝等。

通常将电阻率极大,导电能力非常差,电流几乎不能通过的物体称为绝缘体。绝缘体电阻率一般在  $10^6 \sim 10^{16}$  范围内,所以一般认为绝缘体是不能导电的。电工中常用的绝缘材料有橡胶、塑料、云母、陶瓷、油类、石棉及干燥的林材

等。

绝缘材料长时间受温度、湿度和灰尘等的影响后，绝缘性和机械性能要下降，这种现象叫做绝缘老化。绝缘材料老化后，由于绝缘强度的降低，可能在电气设备运行中造成绝缘损坏称为绝缘击穿，影响设备的正常工作。如电机、变压器外壳的带电现象，就是由于绝缘强度降低造成的。所以，运行中的电气设备都要定期检查绝缘强度以保证运行安全。

#### 四、电感和电容

##### 1. 电感

当变化的电流通过线圈时，线圈中会产生感应电动势来阻止电流的变化，这种性质称为线圈的电感。电感的常用单位是H，mH和 $\mu\text{H}$ 。其间关系为

$$1\text{H}=1000\text{mH}$$

$$1\text{mH}=1000\mu\text{H}$$

一般收音机用的天线线圈的电感为数十至数百 $\mu\text{H}$ ，长1km、截面为 $16\text{mm}^2$ 的穿管铝线的电感约为6.33mH。由于有电感的作用，当交流电流流经线圈时还会遇到另一种阻力，这种阻力为感抗。

##### 2. 电容

被介质隔离的两个导体在一定电压的作用下所能容纳电荷的能力被称为电容。电容的常用单位是F， $\mu\text{F}$ 和PF。其间关系为

$$1\text{F}=10^6\mu\text{F}$$

$$1\mu\text{F}=10^6\text{PF}=10^6\mu\mu\text{F}$$

配电线路的对地电容一般小于 $0.1\mu\text{F}/\text{km}$ ；人体的对地电容一般为数十至数百PF。由于有电容的作用，当交流电流

流经电容器时也会遇到另一种阻力,这种阻力称为容抗。

### 五、欧姆定律

在电路中,电流是带电微粒沿导线的定向移动;电压可理解为产生电流的能力。欧姆定律是表示电路中电压、电流和电阻这三个基本物理量之间关系的定律。定律指出,在一段电路中,流过电阻  $R$  的电流  $I$  与加在电阻上的电压  $U$  成正比,而与这段电路的电阻成反比,即

$$I = \frac{U}{R}$$

式中  $U$ ——电路上的电压,  $V$ ;

$I$ ——流经电路的电流,  $A$ ;

$R$ ——电路的电阻,  $\Omega$ 。

从欧姆定律可知,在电路中如果电压保持不变,电阻越小则电流越大;而电阻越大则电流越小。当电阻趋近于零时,电流很大,这种电路状态称为短路;当电阻趋近于无穷大时,电流几乎为零,这种电路状态称为开路。

### 六、电压降和电压损失

由欧姆定律可知,电阻有电流通过时,两端必有电压。这个电压习惯上叫做电压降。通常导线都是有电阻的,当用导线传输

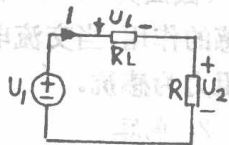


图 1—2 直流输电的电路

电流时,就产生电压降,因此直流输电线路末端的电压总是比始端的电压低。如图 1—2 所示,电路中  $U_2$  是小于  $U_1$  的,其小的数值等于线路电阻  $R_L$  上的电压  $U_L$ 。输电线路电压降低的数值叫做电压损失。如果线路较长,电源电压较低,线路电流又较大,这样线路的电压损失就较大,供给负载的电

压将会明显下降，影响设备的正常工作。

## § 2 交流电

### 一、正弦交流电

生产和生活中使用的交流电大部分都是正弦交流电。其特点是电流和电压的大小、方向随时间按正弦函数的规律变化。以电压为例，图 1—3 所示的正弦交流电可以表示为：

$$u = U_m \sin (2\pi f t + \varphi) = U_m \sin (\omega t + \varphi)$$

式中  $u$ ——时刻  $t$  的电压瞬时值，V；

$U_m$ ——电压的最大值，V；

$f$ ——频率，Hz；

$t$ ——时间，s；

$\varphi$ ——初相位，rad；

$\omega$ ——角频率， $\omega = 2\pi f$ ，rad/s。

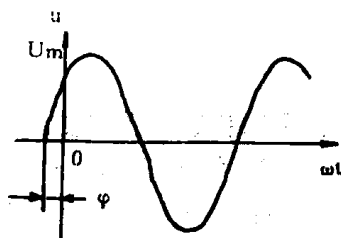


图 1—3 正弦交流电

通常用交流电的有效值来表征交流电的大小，有效值是指与交流电的热效应相等的直流电的数值。对于正弦交流电，最大值  $U_m$ ，和有效值  $U$  的关系为

$$U_m = \sqrt{2}U$$

最大值（或有效值）、角频率（或频率）和初相位称为正弦交流电的三要素。这是因为这三个物理量可以完整地表示一个正弦交流电的特征。

正弦交流电路中，感抗与电感的表示为



$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

式中  $X_L$ ——感抗,  $\Omega$ ;

$f$ ——电源的频率,  $\text{Hz}$ ;

$L$ ——线圈的电感,  $\text{H}$ ;

$\omega$ ——电源的角频率,  $\omega = 2\pi f, \text{rad/s}$ 。

正弦交流电路中,容抗和电容的关系可以表示为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$$

式中  $X_C$ ——电容器的容抗,  $\Omega$ ;

$C$ ——电容器的电容,  $\text{F}$ 。

交流电流通过具有电阻、电感、电容的电路时。电阻、感抗、容抗都有阻碍电流通过的作用。这种阻力称为阻抗。在电路图中,阻抗用符号  $Z$  表示。在交流电路中,阻抗包含电阻和电抗(感抗和容抗统称电抗)两部分。阻抗按下式计算

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

式中,  $R$  和  $X$  分别为电阻和电抗。串联电路中,电抗等于感抗和容抗的差值,即

$$X = X_L - X_C$$

根据上述关系,阻抗、电阻和电抗可以构成一个如图 1-4 所示的直角三角形,称为阻抗三角形。图中,  $\varphi$  角为阻抗角。在这种电路中,  $\varphi$  角即电流与电压之间的相位差角。常称为功率因数角。功率因数角的余弦  $\cos\varphi$  称为功率因数。功率因数按下式计算:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

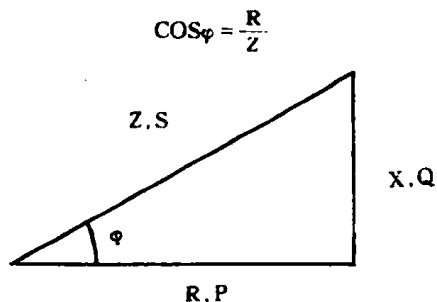


图 1-4 阻抗三角形

例 1-3: 某电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  的串联电路, 已知  $R=80\Omega$ ,  $L=300\text{mL}$ ,  $C=80\mu\text{F}$ , 电源频率  $f=50\text{Hz}$ , 求阻抗值和阻抗角。

解: 感抗和容抗分别为

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 300 \times 10^{-3} = 94.25\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 80 \times 10^{-6}} = 39.79\Omega$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\sqrt{= 80^2 + (94.25 - 39.79)^2} = 96.78\Omega$$

阻抗角为

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = \tan^{-1} \frac{94.25 - 39.79}{80} = 34.25^\circ$$

例 1-4: 某电阻  $R=100\Omega$ 、电感  $L=0.5\text{H}$  的串联电路, 分别接到频率  $f=50\text{Hz}$ 、电压  $U=220\text{V}$  和频率  $f=1000\text{Hz}$ 、电压  $U=400\text{V}$  的电源上。试分别求出两种情况下电路中的电

流。

解：接到 50Hz 的电源上时，电路中的电流为

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1 + X_1^2}} = \frac{220}{\sqrt{100^2 + (2\pi \times 50 \times 0.5)^2}} = 1.18\text{A}$$

接到 100Hz 的电源上时，电路中的电流为

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2 + X_2^2}} = \frac{400}{\sqrt{100^2 + (2\pi \times 100 \times 0.5)^2}} = 0.127\text{A}$$

## 二、三相交流电路

如图 1-5 所示，一般使用的三相交流电是指三个频率和幅值相同、相位互差  $1/3$  周期的正弦交流电。由三相交流电构成的电路就是三相交流电路。

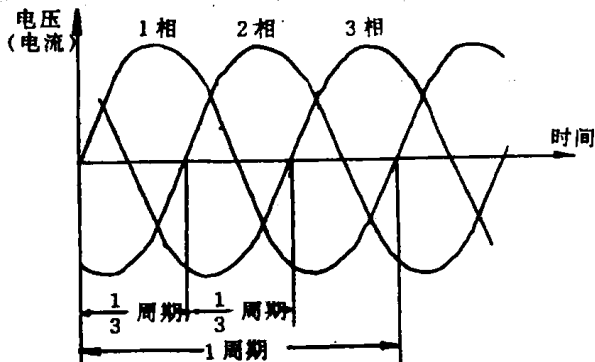


图 1-5 三相交流电

三相交流电源可根据设计接成星形或三角形(见图 1-6)。星形接法是将三个单相电源的一端(首端或末端)连接在一起，联成的公共点叫电源的中性点，从电源中性点引出一根线，这根线就称为中性线或中线。星形连接的三相电源向负载提供两种电压，即相电压和线电压。相电压是指每一相线与中

性线之间的电压,而线电压是指每两相线路之间的电压。三角形接法是将三相电源的每相绕组,依次首尾相连接构成闭合回路,首端引出导线至负载,电源为三角形接法时,线电压等于相电压。三角形接法时有两种电流,每相电源上的是相电流,线路上的是线电流。

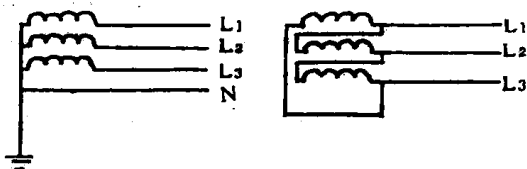


图 1—6 三相交流电源的连接

(a)星形接法

(b)三角形接法

三相负载也可根据设计接成星形或三角形(图 1—7)。星形接法的也有线电压与相电压之分,三角形接法的也有线电流与相电流之分。

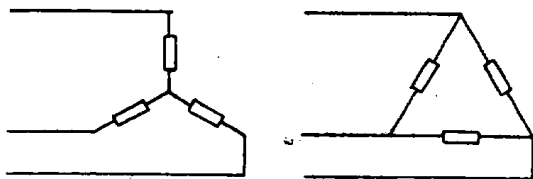


图 1—7 三相交流负载的连接

(a)星形接法

(b)三角形接法

不论是三相电源还是三相的负载,当三相电流大小相等、相位依次相差  $1/3$  周期时,则称为对称三相电路或平衡三相电路。三相平衡电路中,线电压  $U_L$  和相电压  $U_P$ 、线电流  $I_L$  和相电流  $I_P$  之间有如下关系:

$$\text{星形连接} \quad U_L = \sqrt{3} U_P$$

$$I_L = I_P$$

$$\text{三角形连接} \quad U_L = U_P$$

$$I_L = \sqrt{3} I_P$$

例 1—5: 某相电压 220V 的 TN—C 系统(三相四线线路)中, PEN 线(零线)断开, 第 1 相无负荷, 第 2 相接有 40W 白炽灯 12 盏, 第 3 相接有 40W 白炽灯 3 盏, 试计算第 2 相和第 3 相的灯实际承受的电压。

解: 由于 PEN 线断开以及第 1 相无负荷, 相当于第 2 相负荷与第 3 相负荷串联起来接到第 2、第 3 两相之间的线电压上。第 2 相负荷、第 3 相负荷的电阻分别为

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{40 \times 12} = 100.8 \Omega$$

$$R_3 = \frac{U^2}{P_3} = \frac{220^2}{40 \times 3} = 403.3 \Omega$$

线路上的电流为

$$I = \frac{\sqrt{3} U}{R_2 + R_3} = \frac{\sqrt{3} \times 220}{100.8 + 403.3} = 0.756 \text{ A}$$

第 2 相和第 3 相的灯承受的电压为

$$U_2 = IR_2 = 0.756 \times 100.8 = 76.2 \text{ V}$$

$$U_3 = IR_3 = 0.756 \times 403.3 = 304.7 \text{ V}$$

### 三、电功率和电能

#### 1. 电功率

电气设备消耗电能, 将电能转换为机械能、热能等其它能量。电功率表示电气设备作功的能力, 即单位时间所作的功。

在直流电路或纯电阻单相交流电路中,电功率可以表示为:

$$P=UI=I^2R=\frac{U^2}{R}$$

式中  $P$ ——电功率,  $W$ ;

$U$ ——电压,  $U$ ;

$I$ ——电流,  $A$ ;

$R$ ——电阻,  $\Omega$ 。

当交流电路中存在电容或电感时,其电抗不消耗电能,电容或电感与电源之间存在着能量交换,这种能量交换在电路计算中表现为无功功率。此时,单相电路中的功率表示为

$$P=UI\cos\varphi$$

$$Q=UI\sin\varphi$$

式中  $P$ ——有功功率,  $W$ ;

$Q$ ——无功功率,  $\text{var}$ ;

$U$ ——电压,  $V$

$I$ ——电流,  $A$ ;

$\varphi$ ——功率因数角,电压和电流之间的相位差角。

三相交流电路的一般表达式为

$$P=U_{P_1}I_{P_1}\cos\varphi_{P_1}+U_{P_2}I_{P_2}\cos\varphi_{P_2}+U_{P_3}I_{P_3}\cos\varphi_{P_3}$$

$$Q=U_{P_1}I_{P_1}\sin\varphi_{P_1}+U_{P_2}I_{P_2}\sin\varphi_{P_2}+U_{P_3}I_{P_3}\sin\varphi_{P_3}$$

式中,下角  $P_1, P_2$  和  $P_3$  分别表示相应于第 1 相、第 2 相和第 3 相的物理量。

对于对称三相电路,功率表达式可简化为

$$P=\sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi=3U_P I_P \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi = 3 U_P I_P \sin\varphi$$

式中  $P$ ——三相有功功率, W;

$Q$ ——三相无功功率, var;

$U_L$  和  $U_P$ ——线电压和相电压, V;

$I_L$  和  $I_P$ ——线电流和相电流, A;

$\varphi$ ——相功率因数角。

有功功率和无功功率的几何和称为视在功率, 即:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

单相电路中视在功率表示为

$$S = UI$$

对称三相电路视在功率表示为

$$S = \sqrt{3} UI$$

式中、 $S$ ——视在功率, VA。

视在功率表示, 为满足电阻和电抗的需要, 保证电气设备正常工作, 电源需具备的供电能力。串联电路中, 图 1-4 所示的阻抗三角形就是由  $P$  (与  $R$  对应),  $Q$  (与  $X$  对应),  $S$  (与  $Z$  对应) 组成的功率三角形。

电能表示电气设备在一段时间内所转换的能量, 即:

$$W = Pt$$

式中  $W$ ——电能, J;

$P$ ——有功功率, W;

$t$ ——持续时间, s。

实用中常用 kWh 作为电能的单位, 其间关系为

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

例 1-6: 把电阻  $R = 4\Omega$ 、感抗  $X_L = 3\Omega$  的串联负载连接

成三角形,接到相电压 220V、星形接法的三相交流电源上,试求负载上的相电压、线电压、相电流、线电流和有功功率。

解:电源为星形接法,其线电压为

$$U_L = \sqrt{3} U_P = \sqrt{3} \times 220 = 381\text{V}$$

负载为三角形接法,其相电压与线电压相等,为 381。  
每相阻抗为

$$Z = \sqrt{P^2 + X^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5\Omega$$

相电流、线电流和有功功率分别为

$$I_P = \frac{U_L}{Z} = \frac{381}{5} = 76.2\text{A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_P = \sqrt{3} \times 76.2 = 132\text{A}$$

$$P = 3I_P^2 R = 3 \times 76.2^2 \times 4 = 69.7\text{kW}$$

例 1—7:某日光灯电路,额定电压为 220V,电路中电阻为  $302\Omega$ ,电路中电感为  $1.66\text{H}$ ,电源频率为  $50\text{Hz}$ ,试计算电路中的电流、视在功率、有功功率、无功功率和功率因数。

解:本题题意给定为电阻与电感串联的单相交流电路。按给定条件可求得

电阻  $P = 302\Omega$

电抗  $X_L = \omega L = 2\pi fL = 2\pi \times 50 \times 1.66 = 521.6\Omega$

电流  $I = \frac{U}{\sqrt{P^2 + X^2}} = \frac{220}{\sqrt{302^2 + 521.6^2}} = 0.365\text{A}$

视在功率  $S = UI = 220 \times 0.365 = 80.3\text{VA}$

有功功率  $P = I^2 P = 0.365^2 \times 302 = 40.2\text{W}$

无功功率  $Q = I^2 X_L = 0.365^2 \times 521.6 = 69.5\text{var}$

功率因数  $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{40.2}{80.3} = 0.5$



## 2. 电能

电动机、电灯的功率只表示它工作能力的大小，而它们所完成的工作量，不仅决定于其功率的大小，还与它们工作的时间长短有关。我们用电能来表示电场在一段时间内所做的功。即

$$W = Pt$$

式中  $P$ ——功率，以千瓦为单位；

$t$ ——时间，以小时为单位；

$W$ ——电能，其单位为千瓦小时，或用 kWh 表示，实际上 1 千瓦小时就是平常所说的 1 度电。

在我国的法定计量单位中，采用焦耳作为电能的单位，

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 瓦特} \times 1 \text{ 秒}$$

$$= \frac{1}{3.6} \times 10^{-6} \text{ 千瓦小时}$$

## 四、电磁感应

电磁感应现象就是电产生磁、磁产生电的现象。电磁感应技术在变压器、电动机、电度表、无线电设备等电气设备中得到了广泛的作用。

### 1. 电流的磁场

磁场是一种看不见的、没有不可进入性的空间。磁场的表现之一是引进场域内的磁针发生偏转和取向。表现之二是引进场域内的电流受到力的作用。磁场的强弱是用引进场域内的电流(运动电荷)所受到作用力的大小来衡量的。这一物理量叫做磁感应强度。磁感应强度用  $B$  表示，其单位是 T(特斯拉)或  $\text{Wb}/\text{m}^2$ (韦伯/米<sup>2</sup>)。磁场是有方向的场。因为磁感应强度与磁场前进方向上某一面积的乘积叫做磁通，所以，磁感应