

第 3 章 正弦交流电路



本章首先介绍正弦交流电的三要素及正弦量的概念，着重说明正弦量的相量表示法及阻抗的概念；然后介绍三相四线制供电系统的电路连接方式及主要特点；最后介绍功率因数的概念及单相和三相交流电路功率的计算。

3.1 正弦交流电路的基本概念

大小和方向随时间作周期性变化的电动势、电压和电流称为交流电。在电学发展史上，曾经有过关于使用交流电还是使用直流电的激烈争论。提倡使用直流电的代表人物是大名鼎鼎的发明家爱迪生；而主张改用交流电的代表人物则是比爱迪生小 9 岁的后起之秀特斯拉。1895 年特斯拉研制出变压器，并成功地将美国尼亚加拉发电站发出的交流电输送到千里之遥的洛杉矶，经测算损失的电能仅为直流输送方式的二百分之一。这一具有历史意义的用电革命，轰动了世界科学界，也证明了交流电经变压器升压后的高电压、低电流方式输电，不仅可以大大地降低输电线路上的电能损耗，而且提高了输电距离和输电容量，也宣告了交流电对直流电竞争的胜利。从此，交流供电系统被广泛使用。

进入 21 世纪以来，全球面临着能源危机，世界各国都开始关注风能、太阳能等可再生能源发电的研发。而具备发电条件的地区，往往远离用电集中的工业区和城市，必须远距离输电。人们发现交流电长距离输送时也存在着一一些问题，如必须考虑线路中的感抗和容抗所引起的电能损耗、输送两端交流系统需要同步稳定运行等。为了解决交流输电存在的问题，寻求更合理的输电方式，人们现在又开始采用直流超高压输电。近年的研究表明，当距离超过 800~1000 千米时，高压直流电传输比交流电传输的电损耗小。各国在考虑远距离输电系统时，都倾向于更为经济实用的高压直流输电。1990 年我国建设的第一条长距离大容量高压直流输电线路（湖北葛洲坝至上海的葛南双极直流输电线路）投入运行，其额定容量为 1.2GW，额定电压 $\pm 500\text{kV}$ ，送电距离 104km，中国电力从此进入交直流混合输电的时代。虽然如此，但这并不是简单地恢复到爱迪生时代的直流输电。

发电站发出的电和用户用的电仍然是交流电，只是在远距离输电中，采用换流设备，把交流高压变成直流高压。这样做可以把交流输电用的 3 条电线减为 2 条，大大地节约了输电导线。虽然如此，现代工业生产和日常生活中应用最为广泛的仍然是交流电。

3.1.1 正弦量的三要素

随时间按正弦规律变化的电动势、电压或电流，统称为正弦量（Sinusoidal quantities）。以电流正弦量为例，其瞬时值表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \theta_1)$$

其波形如图 3-1 所示。

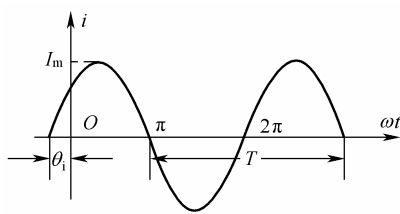


图 3-1 电流正弦量及其波形

其中， I_m 称为幅值（Amplitude）， ω 称为角频率（Angular frequency）， θ_1 称为初相位（Initial phase）。对于正弦交流电来讲，如果知道了幅值、角频率和初相位这 3 个量，则可完全确定该正弦交流电，因此把这 3 个量称为正弦量的三要素。在书写时必须注意，电流和电压的幅值用大写字母加下标 m 表示，如 I_m 、 U_m ；而电流和电压的瞬时值用小写字母 i 、 u 表示。

正弦量三要素中，幅值表示正弦交流电变化过程中所能达到的最大值，因此可用于描述交流电的大小。除此之外，在实际使用中常常采用有效值（Effective value）来度量交流电的大小。

在图 3-2 中，将相同的电阻 R 上分别通以直流电流 I 和交流电流 i ，如果它们在相同时间内，电阻上所消耗的电能相等，则把该直流电流 I 作为交流电流 i 的有效值。



图 3-2 交流电有效值的规定

可以证明，正弦交流电电流的有效值 I 和幅值 I_m 满足如下关系

$$I_m = \sqrt{2}I = 1.414I$$

同理，正弦交流电电压的有效值 U 和幅值 U_m 之间也存在如下关系

$$U_m = \sqrt{2}U = 1.414U$$

需要注意的是，在平时应用中，交流电压表、电流表测量的数据为有效值，交流设备铭牌标注的电压、电流也是有效值。书写时有效值用大写字母表示，如 U 、 I 。

在电子电路中，对于正弦交流信号来说，除了采用有效值之外，还经常采用峰峰值来描述信号值变化范围的大小。峰峰值是指一个周期内信号最大值和最小值之间的差。电压峰峰值用 V_{pp} 表示。显然

$$V_{pp} = U_m - (-U_m) = 2U_m = 2\sqrt{2}U$$

正弦量三要素中的角频率 ω 表示每秒内所变化的弧度，单位为弧度/秒 (rad/s)。 $\omega t + \theta_i$ 称为相位，表示正弦量变化的进程。初相位 θ_i 表示 $t=0$ 时刻的相位，决定了正弦量的初始值。显然，正弦量的初相位不同，其初始值也不同。相位和初相位的单位为弧度 (rad)，也可用角度表示。初相位规定 $-\pi \leq \theta_i (\theta_u) \leq \pi$ 。

在实际使用中，经常用频率 f 替代角频率 ω 表示正弦量变化的快慢。频率 f 表示正弦量每秒内变化的次数，其单位为赫兹 (Hz)。 ω 与周期 T 和频率 f 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

在电力工业的发展初期，电源频率的选取要同时兼顾照明和电力传输效率。如果频率高，电灯的闪烁程度就弱，变压器和发电机的铁心体积都会减少，但电力传输效率会降低，因此世界上存在许多种供电频率。1930年9月，国民政府建设委员会鉴于当时中国发电厂中半数以上的供电频率是 50Hz，把世界多数国家采用的 50Hz 作为中国的供用电标准频率。中华人民共和国成立后至今，中央政府电业主管机关也都将供用电标准频率规定为 50Hz，称为工频。我国现行《供电营业规则》第五十三条规定，在电力系统正常状况下，供电频率的允许偏差为：电网装机容量在 300 万 kW 及以上的，为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；电网装机容量在 300 万 kW 以下的，为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；而在电力系统非正常状况下，供电频率允许偏差不应超过 $\pm 1.0\text{Hz}$ 。

目前，欧洲一些国家电力系统所用的频率 f 标准为 50Hz。而美国和日本等其标准频率为 60Hz。在其他技术领域内使用各种不同的频率，例如，电子技术中常用的有线通信频率为 300Hz~5kHz；无线电工程上用的频率则可高达 $10^4 \sim 30 \times 10^{10}\text{Hz}$ 。

3.1.2 正弦量的相量表示

【问题引导】如图 3-3 所示，已知电流 i_1 和 i_2 的瞬时值表达式，如何写出 i_3 的瞬时值表达式？

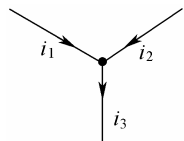


图 3-3 正弦电流运算

用瞬时值表达式和波形图都可以表示正弦交流电的变化规律。但这两种表示方法都不方便用于分析和计算。因此，在正弦交流电路中，分析和计算都采用相量表示法。

用复数的运算方法进行正弦交流电的分析和计算，称为相量表示法。

1. 复数的两种表示形式

设 A 为一复数，其代数式表示为

$$A = a + jb$$

a 和 b 分别为其实部和虚部，其中 $j = \sqrt{-1}$ 为虚部单位。

复数 A 可以用复平面上的有向线段表示，如图 3-4 所示。该有向线段的长度 r 称为复数 A 的模，该有向线段与实轴正方向的夹角 θ 称为复数 A 的辐角。

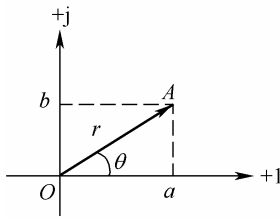


图 3-4 复数的表示

因此，复数 A 也可以写成极坐标式

$$A = r \angle \theta$$

用相量表示法分析电路，常常需要在代数式和极坐标式之间进行转换。如复数相加或相减，则将复数先化成代数型再进行加减运算；而复数相乘或相除则先化成极坐标式再进行，这样往往可以简化运算。

例如，若 $A_1 = a_1 + jb_1 = r_1 \angle \theta_1$ 、 $A_2 = a_2 + jb_2 = r_2 \angle \theta_2$ ，则

$$A_1 \pm A_2 = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2)$$

$$A_1 \cdot A_2 = r_1 r_2 \angle \theta_1 + \theta_2$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2} \angle \theta_1 - \theta_2$$

由图 3-4 的几何关系可知，如果已知复数 A 的极坐标式，转换成代数式的计算式为

$$\begin{cases} a = r \cos \theta \\ b = r \sin \theta \end{cases}$$

如果已知复数 A 的代数式，转换成极坐标式，其计算式为

$$\begin{cases} r = \sqrt{a^2 + b^2} \\ \theta = \arctan \frac{b}{a} \end{cases}$$

转换时需要注意，复数的模只取正值，辐角的取值则根据复数在复平面上的象限而定。

例 3-1 已知两个复数为 $A_1 = 3 + j4$, $A_2 = 8 - j8$, 求它们的和、差、积、商。

解: $A_1 + A_2 = (3 + j4) + (8 - j8) = (3 + 8) + j(4 - 8) = 11 - j4$

$A_1 - A_2 = (3 + j4) - (8 - j8) = (3 - 8) + j(4 + 8) = -5 + j12$

先将 A_1 、 A_2 转换成极坐标式，再进行乘除运算。

$$A_1 = 3 + j4 = \sqrt{3^2 + 4^2} \angle \arctan \frac{4}{3} = 5 \angle 53.1^\circ$$

$$A_2 = 8 - j8 = \sqrt{8^2 + 8^2} \angle \arctan \frac{-8}{8} = 8\sqrt{2} \angle -45^\circ$$

$$A_1 \cdot A_2 = 5 \angle 53.1^\circ \times 8\sqrt{2} \angle -45^\circ = 40\sqrt{2} \angle 8.1^\circ$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{5 \angle 53.1^\circ}{8\sqrt{2} \angle -45^\circ} = 0.31 \angle 98.1^\circ$$

2. 相量表示法

正弦量具有幅值、频率及初相位三个基本特征量，表示一个正弦量就要将这三要素表示出来。但在工业生活用电中，交流电的频率是工频，固定不变。在线性电路中，电路中各处电压和电流的频率也是相同的，其角频率 ω 固定不变，在电路分析中不需考虑角频率 ω 。这样，在正弦交流电的三要素中，实际上只需确定幅值和初相位这两个要素。

对于正弦电压 $u = U_m \sin(\omega t + \theta_u)$ ，如将图 3-4 中的复数 A 取 $r = U_m$, $\theta = \theta_u$ ，则复数 A 正好包括幅值 U_m 和初相位 θ_u 两个要素，因此复数 A 可以表示正弦电压 $u = U_m \sin(\omega t + \theta_u)$ 。

表示正弦量的复数称为相量 (Phasor)。为了区别于一般复数，相量用大写字母上加一点来表示。如，用 \dot{I}_m 和 \dot{U}_m 表示电流和电压的幅值相量，用 \dot{I} 和 \dot{U} 表示电流和电压的有效值相量。对于正弦电压 $u = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) \text{V}$ ，其幅值相量和有效值相量分别为

$$\begin{aligned} \dot{U}_m &= 220\sqrt{2} \angle 30^\circ \text{ V} \\ \dot{U} &= 220 \angle 30^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

显然，幅值相量的模就是幅值，而有效值相量的模就是有效值。所以，只要知道了正弦量的瞬时表达式，就可以写出相量的极坐标式；反之，若已知相量的极坐

标式,也可以写出相应正弦量的瞬时表达式。在正弦量用相量表示后,正弦量的运算就可转化为复数运算。

例 3-2 已知

$$i_1 = 12.7\sqrt{2} \sin(314t + 30^\circ) \text{A}$$

$$i_2 = 11\sqrt{2} \sin(314t - 60^\circ) \text{A}$$

求 $i = i_1 + i_2$ 。

解: 第一步,根据正弦量的瞬时值表达式写出相量

$$\dot{I}_1 = 12.7 \angle 30^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = 11 \angle -60^\circ \text{ A}$$

第二步,用相量运算代替瞬时值表达式的运算

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 12.7 \angle 30^\circ \text{ A} + 11 \angle -60^\circ \text{ A} \\ &= 12.7(\cos 30^\circ + j \sin 30^\circ) \text{ A} + 11(\cos 60^\circ - j \sin 60^\circ) \text{ A} \\ &= 16.5 - j 3.18 \text{ A} \\ &= 16.8 \angle -10.9^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

第三步,由相量写出正弦量的瞬时值表达式

$$i = 16.8\sqrt{2} \sin(314t - 10.9^\circ) \text{A}$$

例 3-3 已知工频条件下 u_1 和 u_2 的有效值分别为 $U_1 = 100\text{V}$, $U_2 = 60\text{V}$, u_1 超前于 u_2 60° , 求总电压 $u = u_1 + u_2$ 及其有效值。

解: 选 u_1 为参考相量

$$\dot{U}_1 = 100 \angle 0^\circ = 100\text{V}$$

$$\dot{U}_2 = 100 \angle -60^\circ = (30 - j 51.96)\text{V}$$

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = 100 + 30 - j 51.96 = 130 - j 51.96 = 140 \angle -21.79^\circ \text{ V}$$

$$u = 140\sqrt{2} \sin(314t - 21.79^\circ) \text{V}$$

$$U = 140\text{V}$$

由例 3-2 和例 3-3 可以看出,在正弦交流电路中,电流和电压的瞬时值、相量都满足基尔霍夫定律,而有效值一般情况下不满足基尔霍夫定律。即对于任意时刻,任意节点有

$$\sum i = 0 \quad (\text{KCL 瞬时值形式})$$

$$\sum \dot{i} = 0 \quad (\text{KCL 相量形式})$$

$$\sum I \neq 0$$

对于任意时刻,任意回路各段电压有

$$\sum u = 0 \quad (\text{KVL 瞬时值形式})$$

$$\begin{aligned}\sum \dot{U} &= 0 \quad (\text{KVL 相量形式}) \\ \sum I &\neq 0\end{aligned}$$

在相量表示法中, 值得注意的是, 只有正弦量才能用相量表示。同时, 由于相量只具备了正弦量三要素中的两个要素, 因此只是代表正弦量, 并不等于正弦量。

【思考与讨论】

什么条件下, 电流和电压的有效值满足 KCL 和 KVL?

3.1.3 阻抗

在正弦交流电路中, 负载通常用阻抗 (Impedance) 来表示, 其符号为 Z 。在电压和电流频率相同的条件下, 阻抗 Z 的定义为负载端电压相量 \dot{U} 除以流过负载的电流相量 \dot{I} , 即

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$$

显然, 阻抗 Z 为复数, 单位为欧姆 (Ω), 其符号如图 3-5 所示。

阻抗 Z 的极坐标式为

$$Z = |Z| \angle \varphi$$

$|Z|$ 称为阻抗模, 它反映了阻抗的大小; φ 为阻抗角。

假设 $\dot{U} = U \angle \theta_u$, $\dot{I} = I \angle \theta_i$, 则

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} \angle \theta_u - \theta_i$$

由此可得

$$|Z| = \frac{U}{I}, \quad \varphi = \theta_u - \theta_i$$

即阻抗模 $|Z|$ 等于电压的有效值除以电流的有效值, 而阻抗角 φ 等于同频率的电压初相位与电流初相位之差。之所以在正弦交流电路中, 同频率的电压和电流相位往往并不相同, 存在着相位差, 是由于电路中有电容、电感等储能元件的缘故。相位差与时间无关, 并且等于初相位之差。阻抗角 φ 则因为等于同频率的电压和电流相位差, 因此在正弦交流电路中是一个十分重要的概念, 许多分析与计算都与它相关。

阻抗具有类似于电阻串并联的性质, 即在正弦交流电路中, 串联电路的总阻抗等于各个阻抗之和, 并联电路总阻抗的倒数等于各支路阻抗倒数之和。图 3-6 (a) 和 (b) 分别为两个阻抗串联与并联的结果。

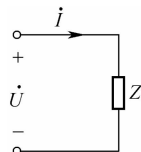


图 3-5 阻抗

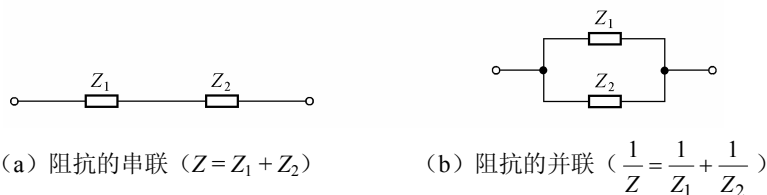


图 3-6 阻抗的串联与并联

例 3-4 已知某负载的电流 $\dot{I}_A = 5\angle 10^\circ$ A, $\dot{U}_{AB} = 380\angle 75^\circ$ V, 求负载的阻抗。

解: $Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$

$$= \frac{220\angle 45^\circ}{5\angle 10^\circ}$$

$$= 44\angle 35^\circ \Omega$$

☞ 正弦交流电路基本概念小结:

* 按正弦规律变化的电压、电流和电动势称为正弦量。幅值、角频率和初相位是正弦量的三要素。

* 用于表示正弦量的复数称为相量, 常用的相量形式有代数式和极坐标式。在正弦量用相量表示后, 正弦量之间的运算可转换成相量的运算, 称为相量表示法。

* 在正弦交流电路分析中, 相量满足基尔霍夫定律。

* 负载可用阻抗 Z 表示, 阻抗 Z 定义为同频率的电压相量除以电流相量。阻抗模 $|Z|$ 反映了阻抗的大小, 其值等于电压的有效值除以电流的有效值; 阻抗角 φ 则等于电压与电流的初相位之差。阻抗 Z 具有类似于电阻的串并联性质。

3.2 三相四线制供电系统

【问题引导】 目前在发电及电力传输中为什么多采用三相四线制供电系统?

3.2.1 三相四线制供电电路

目前发电及供电系统都是采用三相交流电。在普通家庭中所使用的照明电, 实际是三相交流电其中的一相。

如图 3-7 所示, 三相电源 (Three-phase source) 一般是由三相交流发电机三相对称绕组产生的三个频率相同、幅值相等、相位互差 120° 的三相对称正弦电压

u_A 、 u_B 和 u_C 。每相电源绕组的首端分别用 A、B、C 表示，末端分别用 X、Y、Z 表示。

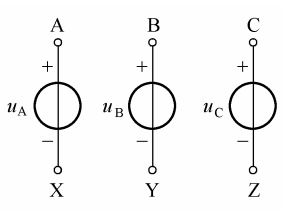


图 3-7 三相对称正弦电压

三相对称正弦电压瞬时值表达式分别为

$$u_A = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

$$u_B = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_C = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ)$$

其波形如图 3-8 所示。

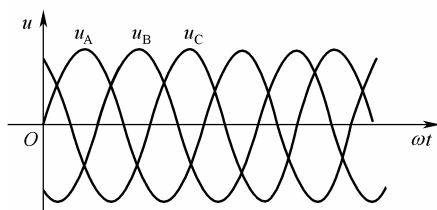


图 3-8 三相电压的波形图

由瞬时值表达式可知，三相对称正弦电压的有效值相量为

$$\dot{U}_A = U \angle 0^\circ = U$$

$$\dot{U}_B = U \angle -120^\circ = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}U$$

$$\dot{U}_C = U \angle 120^\circ = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$$

则

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (3-1)$$

即三相对称电压相量之和等于零。式 (3-1) 同时表明，任一时刻三相对称正弦电压的瞬时值之和等于零，即

$$u_A + u_B + u_C = 0$$

发电机三相电源绕组的接法通常采用如图 3-9 所示的星形接法，即将三相电

源绕组的 3 个末端 X、Y、Z 连接在一起称为中性点，简称为中点。中点的引出线 N 称为中性线，简称中线，俗称零线。电源首端 A、B、C 引出的线称为相线或端线，俗称火线。这种接法的三相电源通过三根相线和一根中线向负载供电，故称为三相四线制电源。

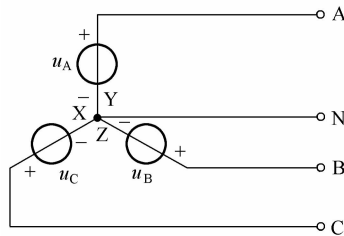


图 3-9 三相四线制供电系统

在三相四线制电源中，相线与中性线之间的电压 u_A 、 u_B 、 u_C 称为相电压 (Phase voltage)，其有效值用 U_P 表示，且 $U_P = U$ 。相线与相线之间的电压 u_{AB} 、 u_{BC} 和 u_{CA} 称为线电压 (Line voltage)，其有效值用 U_L 表示。显然，线电压和相电压之间满足相量形式的 KVL，故

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ &= U - \left(-\frac{U}{2} - j\frac{\sqrt{3}U}{2} \right) \\ &= \frac{3U}{2} + j\frac{\sqrt{3}U}{2} \\ &= \sqrt{3}U \angle 30^\circ\end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C = \sqrt{3}U \angle -90^\circ \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A = \sqrt{3}U \angle 150^\circ\end{aligned}$$

由上面式子，可看出三相四线制供电电源中，线电压之间也互差 120° ，同时线电压有效值 U_L 是相电压有效值 U_P 的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$U_L = \sqrt{3}U_P$$

我国在低压配电系统中，相电压有效值为 $U_P = 220 \text{ V}$ ，线电压有效值为 $U_L = \sqrt{3} \times 220 = 380 \text{ V}$ （近似值）。

由于三相四线制电源可以向外部提供两种不同大小的电压，电路负载可以根据工作时的额定电压来选择相电压还是线电压，同时三相四线制电源还比单独使用三个单相电源更节省导线，故在实际应用中主要采用三相四线制电源。

3.2.2 三相电路负载的连接

电路负载根据其接入电源时，只需要接入一相电源还是三相电源，可分为单相负载和三相负载。我们日常生活中使用的普通电器如电视机、洗衣机、电饭煲、空调、冰箱、电脑等都是单相负载。

三相负载，可划分为两类：一类是由三个单相负载组成的三相负载。这类负载如图 3-10 中的电灯，9 个电灯按照每 3 个一组构成单相负载分别接在三根相线和零线上组成了三相负载；另一类本身就是三相负载，如图 3-10 中的电动机。

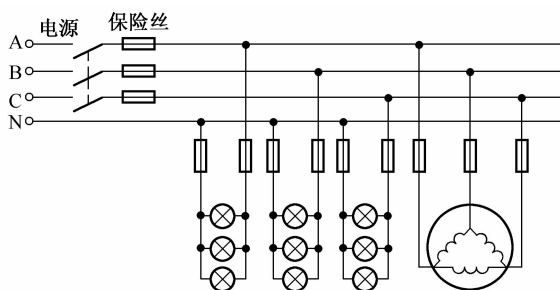


图 3-10 三相负载

三相负载有星形（Y 形）和三角形（ Δ 形）两种接法，如图 3-11 所示。图 3-10 中，电灯的连接方式为星形接法，而电动机内部绕线的连接方式则为三角形接法。三相负载中，如果 $Z_A = Z_B = Z_C$ ，三相负载为对称负载，否则为不对称负载。

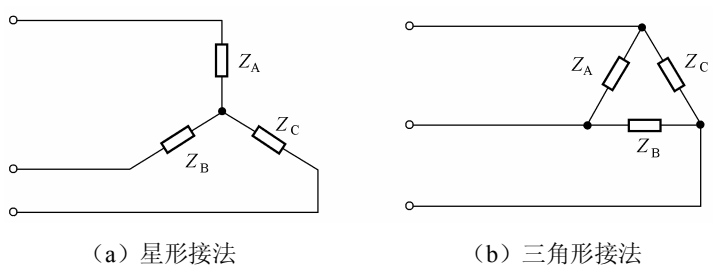


图 3-11 三相负载接法

日常生活中，最常见的三相电路是如图 3-12 所示的负载星形连接后与星形连接的三相电源构成的三相四线制供电电路。电路中，星形连接的三相负载 Z_A 、 Z_B 和 Z_C 其末端接在一起，构成了负载中性点 N' 接于电源的中线上，另一端分别与电源的三根相线 A、B、C 相接。电路中流过负载的电流 i_{Z_A} 、 i_{Z_B} 和 i_{Z_C} 称为相电流

(Phase current); 各火线中的电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 和 \dot{I}_C 称为线电流 (Line current); 显然, 负载作星形连接时, 线电流就是相电流。

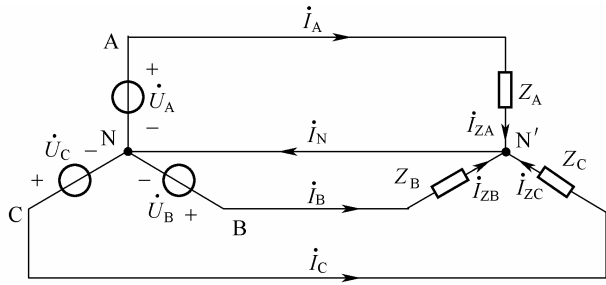


图 3-12 负载星形连接的三相四线制电路

在图 3-12 所示的电流方向下, 由 KCL 知中线电流 \dot{I}_N 等于各相电流之和, 即

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} \quad (3-2)$$

当三相负载为对称负载, 即 $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ 时, 式 (3-2) 变为

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{1}{Z}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{Z}(U \angle 0^\circ + U \angle -120^\circ + U \angle 120^\circ) = 0$$

即三相负载对称时, 中线电流等于零, 此时中线可以省略, 电路变为三相三线制。如三相负载不对称, 则 $\dot{I}_N \neq 0$, 中线电流不等于零, 此时中线不能省略。

同时, 由图 3-12 还可以看出, 负载作星形连接的三相四线制电路中, 不管负载是否对称, 如果忽略输电线的阻抗, 负载的线电压就是电源的线电压; 电源的中点电位也是负载的中点电位; 每相负载的相电压就等于电源的相电压。

【思考与讨论】

三角形连接的三相负载应如何与三相四线制供电电源连接? 此时负载的相电压与线电压与电源的相电压与线电压是什么关系?

例 3-5 有 60 盏额定电压为 220V、额定功率为 100W 的白炽灯, 平均安装在三相电网上, 电源电压为 380/220V, 试画出电路图, 并求电灯全部接通时各相电流和线电流。

解: 由于白炽灯额定电压为 220V, 电源的相电压也是 220V, 故 60 盏白炽灯平均分成 3 组并且 3 组电灯接成星形, 电路如图 3-13 所示。

每相电灯数为

$$N = \frac{60}{3} = 20 \text{ (个)}$$

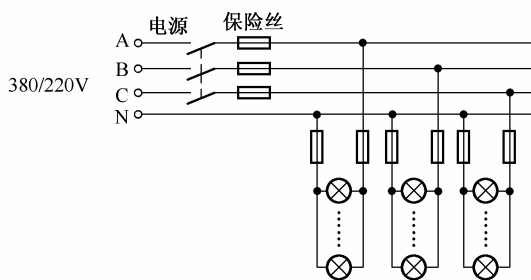


图 3-13 例 3-5 的图

每盏白炽灯的电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

电灯全部接通时每相负载的电阻为

$$R_p = \frac{R}{N} = \frac{484}{20} \Omega = 24.2 \Omega$$

各相电流的有效值为

$$I_p = \frac{U}{R_p} = \frac{220}{24.2} \text{ A} = 9.09 \text{ A}$$

因负载作星形连接, 故

$$I_L = I_p = 9.09 \text{ A}$$

由于白炽灯是纯电阻负载, 故相电流与相电压同相, 各相电流的相位互差 120° , 此时中线电流为零。

例 3-6 如图 3-14 所示三相四线制照明电路, 如 A 相短路:

- (1) 中线未断时, 求各相负载电压;
- (2) 中线断开时, 求各相负载电压。

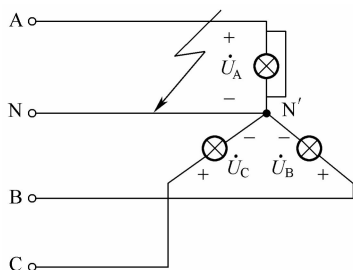


图 3-14 例 3-6 图

解: (1) 中线未断时, 此时 A 相短路, 电流很大, 而 B 相和 C 相未受影响,

其相电压仍为 220V，正常工作。

(2) 中线断开时，此时负载中点 N' 即为 A ，因此负载各相电压为

$$\begin{aligned} U_{AN'} &= 0 \\ U_{BN'} &= U_{BA} = 380 \text{ V} \\ U_{CN'} &= U_{CA} = 380 \text{ V} \end{aligned}$$

此情况下，B 相和 C 相的电灯组由于承受电压上所加的电压都超过额定电压（220V），电灯将会烧坏，这是不允许的。

由例 3-6 可看出，星形连接负载不对称时，必须要有中线，才能保证相电压的对称，使各相负载正常工作。否则各相负载的相电压不再对称，这样会导致有的负载承受的电压超过其额定电压，从而损坏设备；而另一部分负载承受的电压低于其额定电压，使得电气设备不能正常工作。同时为了防止中线断开，中线上不允许装开关和保险丝。在日常生活中，由于所使用的电器并不相同，绝大多数时候，负载都属于不对称负载，因此中线不能省去，必须使用三相四线制电路供电。

近年来，为了更加安全用电起见，在三相四线制供电系统的基础上又发展出了三相五线制供电系统。三相五线制系统，又称保护接地系统，国际电工委员会 IEC 对三相五线制系统的编号为 TN-S，故也称 TN-S 系统。它是在三相四线制供电系统的基础上，再增加一根专用接地线（PE）。这样的供电接线方式就包括三相电源的三根相线、一根中性线（N 线）和一根地线（PE 线）共五根线，所以称为三相五线制系统，如图 3-15 所示。

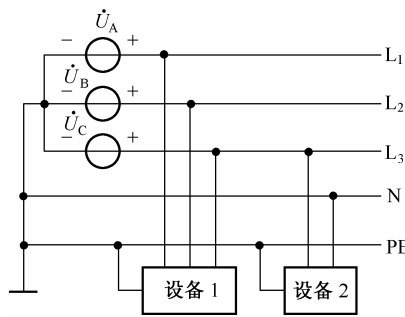


图 3-15 三相五线制供电系统

PE 线的作用是以防止触电为目的的保护线，所有设备的外露可导电部分只与公共的 PE 线相连，对触电起保护作用，因此也称为保护地线或保护零线。与三相四线制相比，三相五线制系统把专用保护线、零线、相线一起送入各家各户，给广大用电者最大限度地减小触电事故的发生。

在应用中需要注意的是地线在供电变压器侧和中性线接到一起，但进入用户侧后不能当作零线使用，否则发生混乱后就与三相四线制无异了。同时为了防止混淆，我国对三相五线制导线颜色规定为：A 线黄色，B 线绿色，C 线红色，N 线蓝色，PE 线黄绿色或黑色。

☞ 三相四线制供电系统小结：

*三相电源由三相发电机产生，并且频率相同、有效值大小相等、相位互差 120° 。

*三相电源按照末端相接的星形连接形式构成了三相四线制供电电源。相线与相线的电压称为线电压，其有效值用 U_L 表示；相线与中线之间的电压称为相电压，其有效值用 U_P 表示。线电压与相电压之间满足 $U_L = \sqrt{3}U_P$ 。

*三相负载作星形连接并与三相四线制供电电源连接构成了三相四线制电路。在负载对称情况下，流过中线的电流等于零，中线可以省略；在负载不对称的情况下，中线电流不等于零，中线不能省略。同时中线的存在可以确保在负载不对称情况下，负载的相电压仍然相等并且等于电源的相电压，确保每一相负载正常工作。

3.3 交流电路的功率

3.3.1 单相交流电路功率

日常生活中会经常看到如图 3-16 的各种电器设备铭牌。铭牌上标有额定功率、最大输出功率等数据。这些功率实际上是有功功率，用大写字母 P 表示，单位有瓦 (W)、千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)。

开关电源						
交流输入	100-240V~, 50/60Hz, 6A					
直流输出	+12V1	+12V2	+5V	+3.3V	-12V	+5VSB
	17A	17A	15A	17A	0.3A	2.0A
最大输出功率	312W (26A MAX)		103W		13.6W	
稳定输出功率	350W					
警告	非专业维修人员请勿自行开启此盖！					

图 3-16 某开关电源的铭牌数据

有功功率是保持用电设备正常运行所需的电功率，也就是将电能转换为其他形式的能量，如机械能、光能、热能的电功率。比如：电动机就是把电能转换为机械能，带动机器设备运转；各种照明设备将电能转换为光能，供人们生活和工作照明；取暖设备则将电能转换成热能。

电路在某一瞬间吸收或发出的功率称为瞬时功率，用小写字母 p 表示。有功功率就是交流电在一个变化周期内瞬时功率的平均值，因此也称为平均功率。

设正弦电路中，电流 i 为

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

则电压 u 可表示为

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi)$$

式中 φ 为电路中同频率的电压与电流的相位差，也是电路的阻抗角。则电路在某一瞬间的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= ui = \sqrt{2}I \sin \omega t \times \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi) \\ &= UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \end{aligned}$$

瞬时功率是随着时间改变而改变的，因此分析和计算瞬时功率毫无意义，为此在平时运用中主要采用平均功率来反映功率的大小。平均功率计算方法为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] dt = UI \cos \varphi$$

可见正弦电路的平均功率不但与电流和电压的有效值有关，还与电压和电流相位差 φ 有关， $\cos \varphi$ 称为电路的功率因数（Power factor）。

同时，由 $P = UI \cos \varphi$ 知

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

因此，如果功率因数 $\cos \varphi$ 变小，在用电负荷不变、实际有功功率 P 和工作电压 U 恒定的情况下，其工作电流 I 变大。电路中导线的截面、保护开关的导电面积都必须加大才能通过更大的电流，故投资亦需增加。同时，电流变大还会导致设备的发热量增加、线路和电源上的功率损耗也增大。

我国现行《供电营业规则》第四十一条对于用户用电功率因数作了规定，即除电网有特殊要求的用户外，用户在当地供电企业规定的电网高峰负荷时的功率因数，应达到下列规定：100kVA 及以上高压供电的用户功率因数为 0.90 以上；其他电力用户和大、中型电力排灌站、趸购转售电企业，功率因数为 0.85 以上；农业用电的功率因数为 0.80 以上。凡功率因数不能达到上述规定的新用户，供电企业可拒绝接电。在第九十六条中，对于供用电双方在合同中订有电压质量责任条款的电力事故赔偿，则规定用户用电的功率因数未达到规定标准的，供电企业

不负赔偿责任。

目前,生产中广泛使用的交流异步电动机的功率因数为0.3~0.85,荧光灯的功率因数为0.4~0.6,这些都不符合要求,所以需要采取措施提高功率因数。

3.3.2 三相交流电路功率

在三相交流电路中,各相功率的计算与单相电路相同。设三相负载相电压分别为 U_{ZA} 、 U_{ZB} 和 U_{ZC} ,相电流分别为 I_{ZA} 、 I_{ZB} 和 I_{ZC} ,相电压和相电流间的相位差分别为 φ_{ZA} 、 φ_{ZB} 和 φ_{ZC} 。由于有功功率守恒,三相负载的总有功功率应是各相负载的有功功率之和。即三相负载的有功功率 P 为

$$P = U_{ZA} I_{ZA} \cos \varphi_{ZA} + U_{ZB} I_{ZB} \cos \varphi_{ZB} + U_{ZC} I_{ZC} \cos \varphi_{ZC}$$

当负载对称时,每相负载的相电压大小相等,流过负载的相电流大小也相等,相电压与相电流的相位差也会相同,则各相负载的有功功率相等,因此三相负载的总有功功率等于单相负载的3倍。假设负载相电压为 U_p ,相电流为 I_p ,相电压与相电流的相位差为 φ ,则对称三相负载的有功功率为

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi$$

同时,由于负载作星形连接时有

$$\begin{cases} U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}} \\ I_p = I_L \end{cases}$$

所以对称三相负载的有功功率还可以用负载的线电压和线电流进行计算,即

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

但需要注意的是,这时的 φ 仍然为相电压与相电流的相位差,而不是线电压与线电流的相位差。同时,虽然上述公式是由负载作星形连接时推导出来,但是适用于负载的三角形连接,三相负载总的功率计算形式与负载的连接方式无关。

例 3-7 由星形连接的三相负载所构成的对称三相电路中,每相负载阻抗 $Z = (6 + j8)\Omega$,电源线电压有效值为380V,求三相负载的有功功率。

解: 由线电压380V求出相电压

$$U_p = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{V}$$

相电流

$$I_p = \frac{U_p}{|Z|} = \frac{220}{\sqrt{6^2 + 8^2}} = 22\text{A}$$

相电压与相电流的相位差,就是阻抗角 φ 为

$$\varphi = \arctan \frac{8}{6} = 53.13^\circ$$

有功功率

$$P = 3U_p I_p \cos \varphi = 3 \times 220 \times 22 \times \cos 53.13^\circ = 8712 \text{ W}$$

交流电路功率小结:

* 单相交流电路的有功功率计算式为 $P = UI \cos \varphi$ ，其中 φ 为电压与电流相位差。

* 不对称三相电路的有功功率等于每一相电路的有功功率之和。

* 对称三相交流电路的有功功率计算式为 $P = 3U_p I_p \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$ 。其中 φ 为相电压与相电流的相位差。计算式与负载接法无关。

3.4 应用实例：漏电保护器的工作原理

电路中安装漏电保护器是防止触电伤亡事故、漏电引起电气火灾和电气设备损坏的重要技术措施。漏电保护器可分为电压型和电流型两大类，其中以电流型漏电保护器应用得最为广泛。普通电流型漏电保护器由零序电流互感器、电子放大器、晶闸管和脱扣器等部分组成，其原理如图 3-17 (b) 所示。其中，零序电流互感器是关键器件，其构造和原理跟普通电流互感器基本相同。零序电流互感器的初级线圈是绞合在一起的 4 根线：3 根火线 L_1 、 L_2 、 L_3 及 1 根零线 N ，而普通电流互感器的初级线圈只是 1 根火线。初级线圈的 4 根线要全部穿过互感器的铁芯，并且 4 根线的一端接电源的主开关，另一端接负载。

在三相四线制供电系统中，由基尔霍夫电流定律可知正常情况下，不管三相负载平衡与否，同一时刻 4 根线的电流相量和都为零，即

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \dot{I}_N = 0$$

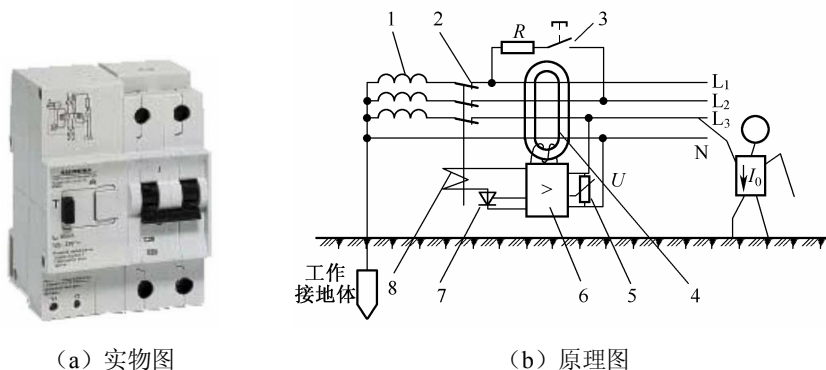
故 4 根线的合成磁通也为零，零序电流互感器的次级线圈没有输出信号。

当火线对地漏电时，如图中人体触电时，触电电流经大地和接地装置回到中性点。这样由于人体触电电流 I_0 的存在，同样由基尔霍夫电流定律可知电流间满足

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \dot{I}_N + \dot{I}_0 = 0$$

从而

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \dot{I}_N = \dot{I}_0 \neq 0$$



(a) 实物图 (b) 原理图
1—供电变压器；2—主开关；3—试验按钮；4—零序电流互感器；
5—压敏电阻；6—放大器；7—晶闸管；8—脱扣器

图 3-17 电流型漏电保护器

即同一时刻 4 根线的电流和不再为零，产生了剩余电流。剩余电流使铁芯中有磁通过，从而互感器的次级线圈有电流信号输出。互感器输出的微弱电流信号输入到电子放大器 6 进行放大，放大器的输出信号用作晶闸管 7 的触发信号，触发信号使晶闸管导通，晶闸管的导通电流流过脱扣器线圈 8 使脱扣器动作而将主开关 2 断开。压敏电阻 5 的阻值随其端电压的升高而降低，压敏电阻的作用是稳定放大器 6 的电源电压。

安装漏电保护器时应注意，负载侧的线路包括相线和工作零线不得与接地装置连接，也不得与保护零线连接。同时工作零线必须经过保护器，而保护零线不得经过保护器。

3.5 辅修内容

家庭供电与人们日常生活密切相关。近年来，随着生活水平的提高，家用电器的种类和数量都越来越多，特别是大功率家用电器的使用，大大增加了家庭用电负荷，也对配电线路的设计和安全用电提出了更高的要求。

3.5.1 家庭用电负荷

用电负荷是指一定时间内用户的用电设备在向电力系统取用的电功率的总和，以千瓦 (kW) 表示。家庭用电中，如果用电负荷超过了家庭用电容量，则容易造成轻则发生电源跳闸，重则短路、引起电气火灾的用电事故。规划家庭供电

用电线路时，回路的设计划分、电线、开关、断路器的选择等均取决于家庭用电负荷，因此科学地估算用电负荷十分重要。

家庭用电负荷的估算方法较多，但常用的简便方法有功率估算法和电流估算法两种。功率估算法在估算时把电器的额定功率除以功率因数并相加，得到的总功率大小就是估算的结果。估算时需要注意，用电设备的类型不同，其功率因数也不同。家庭用电设备有两种类型：一类是有电动机的电感性负载，如电冰箱、空调器、洗衣机、电风扇、抽油烟机、吸尘器等；另一类是把电能转换成光能和热能的电阻性负载，如电饭煲、电炒锅、电炉、白炽灯等。电感性负载的用电器，其功率因数不等于1，通常在0.8左右，因此按0.8进行估算，即要先将其额定功率除以0.8后再相加。电阻性负载其功率因数可视为1，额定功率可直接相加。

电流估算法要稍微麻烦一些。对于电阻性负载，按单相供电（220V）计算，其每千瓦的功率对应的电流为 $1000/220 \approx 4.5\text{A}$ 。因此电阻性负载用电流大小等于该类设备总千瓦数 $\times 4.5\text{A}$ ；而电感性用电设备其用电电流大小为

$$(\text{电感性设备总千瓦数}) / 0.8 \times 4.5\text{A}$$

上述两项电流的总和为该家庭用电电流总和。

需要注意的是，无论是采用功率估算法还是电流估算法来估算家庭用电总负荷时，只需要考虑所有同时使用的用电设备功率或电流之和即可。

3.5.2 家庭配电线路设计

家庭配电线路的设计应充分考虑家庭的用电负荷。目前，一般家庭的供电负荷为4~6kW，入户电源仍然用单相三线制供电。而一些高等住宅用电负荷达10kW及以上，宜采用三相五线制供电。

单相三线制供电的家庭配电线路可分为单回路配电线路和多回路配电线路两种。单回路配电线路如图3-18所示，这种配电方式是所有的家用电器并联接入由火线和零线组成的同一个回路中，主要应用在城镇的老式住宅及农村。它的主要特点是线路简单、非常省线，缺点是电线负荷过大，电线老化快，一处出问题，全部出问题。所以，目前这种布线方式已经被淘汰。

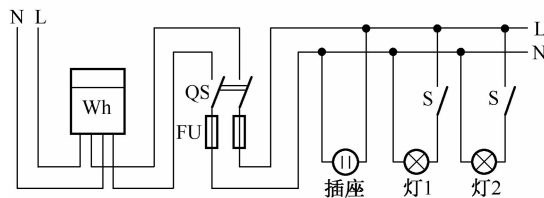


图 3-18 单回路配电线路

现代家庭的配电线路采用的是多回路配电线路。它又可分为两种方式：按房间布线的多回路方式和按功能布线的多回路方式。

某两室一厅按房间布线的多回路配电线路如图 3-19 所示。它的主要特点是比较省线和省工，缺点是一个房间里有大功率的电器、小功率的电器、空气开关等保护设备的配备，必须按大的规格配备，不利于小功率电器设备的保护，容易产生安全隐患。

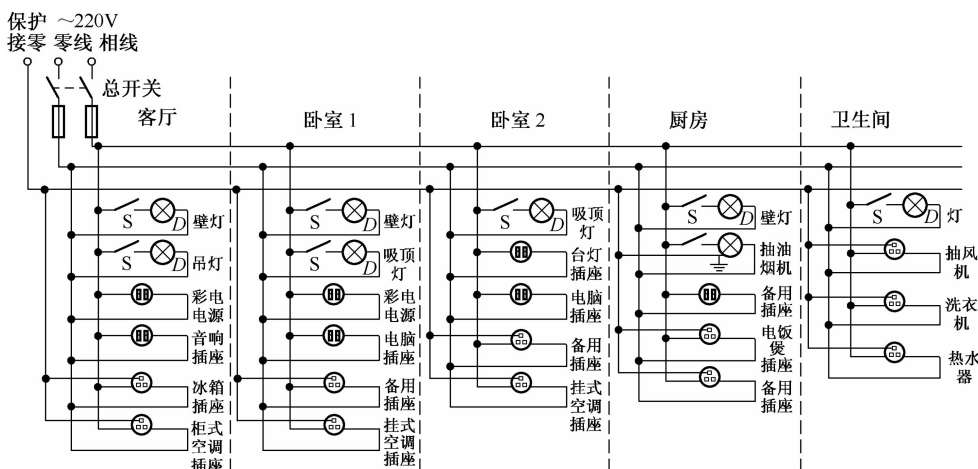


图 3-19 按房间布线的多回路配电线路

按功能布线的多回路配电方式，是目前的主流布线方式。2012年8月1日开始执行的《住宅设计规范》要求：“每套住宅空调电源插座、其他电源插座与照明应分路设置；厨房电源插座和卫生间电源插座，宜设置独立回路。”按功能布线的多回路配电方式，可以避免某个插座回路中电气设备出故障时，影响照明灯具和其他电气设备的正常工作。一般家庭住宅至少应有照明、电脑、空调、厨房、卫生间及其他普通插座等6个回路。在实际应用时还可以根据需要增设1~2个回路，如可设两个照明回路，当其中一个回路出现故障时，不会造成宅内全部黑暗，能给检修带来方便。在天气炎热时，有的家庭往往会同时使用两台空调器，一台制冷量较大的柜式空调器放在客厅，一台壁挂式空调器放在卧室，这时负荷可超过4kW，所以也可用两回路供电。插座可根据实际应用分为两路或三路，厨房用的大功率电器相对比较多，而且使用的频率比较高，可单独使用一个回路；卫生间如果有电热水器或浴霸等大功率电器，也可以设一个单独的回路，而电脑、电视等其他电器用一路。图 3-20 为某两室一厅按功能布线的多回路配电线路。

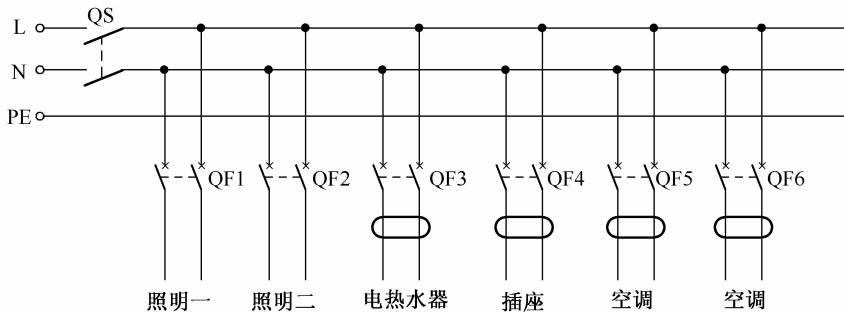


图 3-20 按功能布线的多回路配电线路

3.5.3 家庭用电安全

在普通家庭用电中，由于大多数家用电器的工作电压都是 220V，所以最容易出现的安全用电事故主要有以下两种类型：一种类型是由于电路短路、导线老化、用电负荷过大等其他原因引起的电起火；另一种类型就是不小心触及相线、电器的带电部分或触及电器的绝缘破损部分等引起的触电事故。

由于普通家庭的供电主要为单相三线制供电，因此触电的形式主要为单相触电。在日常工作和生活中，当人体碰触电源相线或低压用电设备的开关、灯头、电熨斗、洗衣机等家用电器的绝缘损坏带电部分，就会发生单相触电情况。单相触电时人体承受的电压是电源的相电压，通过人体的电流主要由人体本身电阻、人体与地面的绝缘情况决定。

单相触电又可分为单线触电和双线触电。双线触电的示意图如图 3-21 所示。双线触电时，由于人体同时接触了相线和中线，因此相线、人体和中线之间形成了通路，就会有电流流过人的身体，此时人站在绝缘板上或穿绝缘鞋等传统的保护措施将不起保护作用。

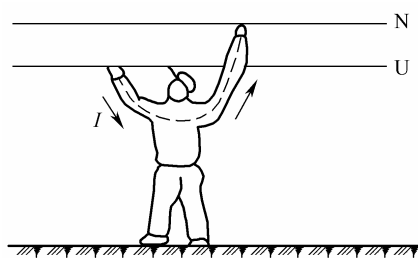


图 3-21 双线触电

单线触电可分为中线接地和中线不接地两种方式，其示意图如图 3-22 所示。

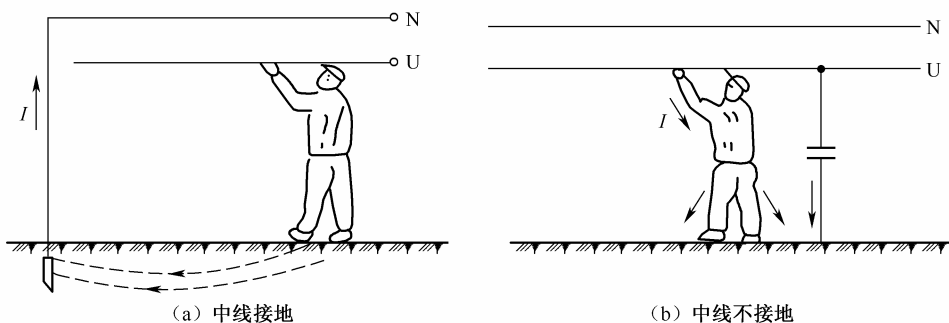


图 3-22 单线触电的两种形式

中线接地情况下的单相触电，相线、人体、大地和中线构成了电流的回路，而在中线不接地的情况下，由于导线与地有分布电容，因此仍然可以由相线、人体、大地和相线与大地之间的分布电容构成电流的回路。

根据伤害程度不同，触电可分为电伤和电击两种。电伤是指人体外部受伤，如与带电体接触后的皮肤红肿等。电击是指电流通过人体而使内部器官受伤的现象，人体常因电击而死亡，它是最危险的触电事故。触电伤人的主要因素是电流，其伤害程度与流过人体的电流的频率、大小、时间及触电者本人的情况有关。研究证明，频率为 $40\sim 60\text{Hz}$ 的电流最危险。研究表明，工频交流 10mA 以上、直流在 50mA 以上的电流通过心脏和大脑时，触电者不能摆脱电源脱险，就会有生命危险，而且人体通电时间越长危险性越大。由欧姆定律可知，电流的大小取决于作用到人体上的电压和人体的电阻。通常皮肤干燥程度、接触面积等因素不同时，人体电阻也不相同，其值为几百至几万欧姆不等。单线触电时如果此时人体站在绝缘板上或穿绝缘鞋，人体与大地间的电阻就会很大，通过人体的电流将很小，这时不会发生触电危险。

要避免家庭用电事故，必须要掌握一定的用电安全知识，用电接线和平时操作时都应该严格遵守电气装置安全操作规则。具体而言，应该从以下几个方面加以注意：

(1) 不要超负荷用电，对于空调、电热水器等大功率电器应使用专用线路，并对其金属外壳做好接地保护，同时正确配置熔断器等保护装置。

(2) 当电气设备采用超过安全电压时，必须采取防止直接接触带电体的保护措施。我国国家标准《安全电压》(GB3805—83) 规定视不同的工作环境，我国安全电压额定值的等级为五个等级，分别为 42V 、 36V 、 24V 、 12V 和 6V 。特别危险环境中使用的手持电动工具应采用 42V 安全电压；有电击危险环境中，使用的手持式照明灯和局部照明灯应采用 36V 或 24V 安全电压；金属容器内、特别潮

湿处等特别危险环境中使用的手持式照明灯应采用 12V 安全电压；在水下作业等场所工作应使用 6V 安全电压。

(3) 认真做好绝缘。在许多场合下，操作者必须戴绝缘手套、穿绝缘鞋，或站在绝缘垫（台）上工作。采用这些绝缘安全用具使人与地面，或使人与工具的金属外壳隔离开来。但需注意的是，在低压带电设备上工作时，绝缘手套、绝缘鞋、绝缘垫（台）可作为基本安全用具使用，但在高压情况下，只能用作辅助安全用具。

(4) 安装漏电保护装置。漏电保护器俗称漏电开关，是用于在电路或电器绝缘受损并发生漏电时的保护电器，一般安装于低压电网电源端或进线段，以实现对所属网络的整体保护。当漏电电流超过允许值时，漏电保护器能够自动切断电源或报警，以保证人身安全。漏电保护器动作灵敏，切断电源时间短，因此只要能够合理选用和正确安装、使用漏电保护器，除了保护人身安全以外，还有防止电气设备损坏及预防火灾的作用。

(5) 接线时应注意选用合适截面积的导线、合格的开关和电器。照明灯具、开关、插头插座、接线盒以及有关电器附件等必须完整无损。

(6) 养成良好的用电习惯，不私自乱拉、乱接电线，不随意将三眼插头改为两眼插头，不用湿手动电气设备及触碰开关插销，不用铁丝、铜丝代替保险丝等。

3.5.4 家庭节约用电

用电设备在使用过程除了转换成有用能量时必须消耗电能之外，还会产生一定电能的损耗。节约用电指的是采取各种措施，降低电能损耗，提高有效用电程度。基本措施主要有：

(1) 普及电能的正确使用方法和节电的基本知识，让每个人都树立起节电意识，从小处做起。例如，电视机不要长时间处于待机状态，这样不仅耗电，而且会降低其寿命。空调匹数应与房间大小相配，使用时室温设置于 27~28℃ 为宜，定期清洗隔尘网，不要频繁启动。冰箱应置于阴凉通风处且冰箱内要适量存放食物，留有冷气对流空隙，不将热的食品放进电冰箱内，定期除霜和清除冷凝器表面积灰，保证冰箱吸热和散热性能。洗衣机应根据衣物的种类和脏污程度确定洗衣时间，同样长的洗涤周期，弱洗功能要比强洗功能省电且会降低电机寿命，所以使用中应尽量等存有足量待洗衣物时再使用洗衣机。

(2) 更新用电设备，选用节能型新产品。如空调选购时应选能效比 2.45 以上或有中国节能产品认证标志的空调。同功率的空调器，能效比每提高 0.1，可节电 3%~4%。照明则应选用节能灯，使用节能灯价格虽高，但寿命长、耗电少，

14W 节能灯相当于 75W 白炽灯的亮度，可节电 75%。



本章小结

本章首先介绍了正弦量及其相量表示，然后介绍了三相四线制供电系统的连接方式、线电压与相电压的关系，重点对中线的作用进行了分析。最后介绍了阻抗及功率因数的概念、单相与三相电路功率的计算。

1. 本章要点

(1) 随时间按正弦规律变化的电动势、电压或电流，统称为正弦量，幅值、角频率和初相位是正弦量的三要素。对于一个复数，如果让复数的模等于幅值或有效值，复数的辐角等于初相位，则这个复数可用以表示正弦量，称为相量。正弦量之间的运算可以转化成相量运算，并且相量满足基尔霍夫定律。

(2) 三相电源由三相发电机产生，它们的有效值相等，相位互差 120° 。三相电源的末端连接在一起称为中性点，由中性点引出的线称为中线，也称零线；三相电源的首端引出线称为相线，也称火线，这种形式的电源为三相四线制电源。在三相四线制电源中，相线与相线之间的电压称为线电压，用 U_L 表示；相线与中线之间的电压称为相电压，用 U_p 表示。线电压与相电压满足 $U_L = \sqrt{3}U_p$ 。

(3) 电压相量除以电流相量定义为阻抗，负载可以用阻抗表示。三相负载的连接方式分为星形连接和三角形连接两种形式。星形连接的三相负载与三相四线制电源连接构成了三相四线制电路。在负载对称情况下，流过中线的电流等于零，中线可以省略；而在负载不对称情况下，流过中线的电流不等于零，中线不能省略。

(4) 单相交流电路的有功功率计算式为 $P = UI\cos\varphi$ ，其中 φ 为电压与电流的相位差， $\cos\varphi$ 为功率因数。三相电路的有功功率等于每一相电路的有功功率之和。在三相负载对称情况下，三相电路的功率为 $P = 3U_p I_p \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$ ，功率的计算与负载的连接方式无关。

2. 本章主要概念和术语

正弦量，相量，三相电源，三相四线制，相线，中线，线电压，相电压，阻抗，三相负载，有功功率，功率因数。

3. 本章基本要求

(1) 理解正弦交流电的相量表示，并能运用相量法进行简单的电路分析与计算。

(2) 掌握三相四线制中线电压与相电压之间的关系，理解中线的作用。

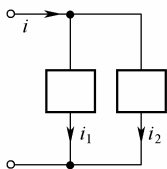


图 3-23 题 3-5 的图

3-6 一批单相用电设备，额定电压均为 220V，若接在三相电源上工作，当电源线电压为 380V，应如何连接？若电源线电压为 220V，又该如何连接？

3-7 对称三相感性负载星形连接，线电压为 380V，线电流 5.8A，三相功率 $P = 3.05\text{kW}$ ，求三相电路的功率因素和每相负载 Z 的阻抗模。

3-8 某三相对称负载，每相阻抗 $Z = (8 + j6)\Omega$ ，将负载连成星形，接于线电压 380V 的三相电源上。试求：相电压、线电流和三相有功功率的大小。