第一章 电路基本原理

第一节 电流和电压

u(t)和i(t)这两个变量是电路中最基本的两个变量，它们刻划了电路的各种关系。

电荷和电流

电荷的概念是用来解释所有电气现象的基本概念。也即，电路中最基本的量是电荷。电荷是构成物质的原子微粒的电气属性，它是以库仑为单位来度量的。

我们从基础物理得知一切物质是由被称为原子的基本构造部分组成的，并且每个原子是由电子，质子和中子组成的。我们还知道电子的电量是负的并且在数值上等于1.602100×10^{-12}C，而质子所带的正电量在数值上与电子相等。质子和电子数量相同使得原子呈现电中性。

让我们来考虑一下电荷的流动。电荷或电的特性是其运动的特性，也就是，它可以从一个地方被移送到另一个地方，在此它可以被转换成另外一种形式的能量。

当我们把一根导线连接到某一电池上时(一种电动势源)，电荷被外力驱使移动；正电荷朝一个方向移动而负电荷朝相反的方向移动。这种电荷的移动产生了电流。我们可以很方便地把电流看作是正电荷的移动，也即，与负电荷的流动方向相反，如图1—1所示。这一惯例是由美国科学家和发明家本杰明－富兰克林引入的。虽然我们现在知道金属导体中的电流是由负电荷引起的，但我们将遵循通用的惯例，即把电流看作是正电荷的单纯的流动。于是电流就是电荷的时率，它是以安培为单位来度量的。从数学上来说，电流i、电荷q以及时间t之间的关系是：

$$i = \frac{dq}{dt} \qquad (1-1)$$

从时间t0到时间t所移送的电荷可由方程（1—1）两边积分求得。我们算得：

$$q = \int_{t_0}^{t} i dt \qquad (1-2)$$

我们通过方程（1—1）定义电流的方式表明电流不必是一个恒值函数，电荷可以不同的方式随时间而变化，这些不同的方式可用各种数学函数表达出来。

电压，能量和功率

在导体中朝一个特定的方向移动电荷需要一些功或者能量的传递，这个功是由外部的电动势来完成的。图1－1所示的电池就是一个典型的例子。这种电动势也被称为电压或电位差。电路中a、b两点间的电压等于从a到b移动单位电荷所需的能量（或所需做的功）。数学表达式为：

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \qquad (1-3)$$

式中w是单位为焦耳的能量而q是单位为库仑的电荷。电压Uab是以伏特为单位来度量的，它是为了纪念意大利物理学家Alessandro Antonio Volta而命名的，这位意大利物理学家发明了首个伏达电池。于是电压（或电压差）等于将单位电荷在元件中移动所需的能量，它是以伏特为单位来度量的。

图1－2显示了某个元件（用一个矩形框来表示）两端a、b之间的电压。正号（＋）和负号（－）被用来指明参考方向或电压的极性，Uab可以通过以下两种方法来解释。1）在Uab伏特的电位中a点电位高于b点，2）a点电位相对于b点而言是Uab，通常在逻辑上遵循

$$u_{ab} = -u_{ba} \qquad (1-4)$$

虽然电流和电压是电路的两个基本变量，但仅有它们两个是不够的。从实际应用来说，我们需要知道功率和能量。为了把功率和能量同电压、电流联系起来，我们重温物理学中关于功率是消耗或吸收的能量的时率，它是以瓦特为单位来度量的。我们把这个关系式写成：

$$p = \frac{dw}{dt} \qquad (1-5)$$

式中p是以瓦特为单位的功率，w是以焦耳为单位的能量，t是以秒为单位的时间，从方程（1—1）、（1—3）和（1—5）可以推出

$$p = ui \qquad (1-6)$$

由于u和i通常是时间的函数，方程（1—6）中的功率p是个时间变量于是被称为瞬时功率，某一元件吸收或提供的功率等于元件两端电压和通过它的电流的乘积。如果这个功率的符号是正的，那么功率向元件释放或被元件吸收。另一方面，如果功率的符号是负的，那么功率是由元件提供的。但我们如何得知何时功率为正或为负？

在我们确定功率符号时，电流的方向和电压的极性起着主要的作用，这就是我们在分析图1—3（a）所显示的电流i和电压u的关系时特别谨慎的重要原因。为了使功率的符号为正，电压的极性和电流的方向必须与图1—3（a）所示的一致。

这种情况被称为无源符号惯例，对于无源符号惯例来说，电流流进电压的正极。在这种情况下，p＝ui或ui>0，表明元件是在吸收功率。而如果p＝－ui或ui<0，如图1－3（b）所示时，表明元件是在释放或提供功率。

事实上，在任何电路中必须遵循能量守恒定律。由于这个原因，任一电路中在任何瞬间功率的代数和必须等于零

$$\sum p = 0 \qquad (1-7)$$

这再一次证明了提供给电路的功率必须与吸收的功率相平衡这一事实。从方程（1－7）可知，从时间t0到时间t被元件吸收或由元件提供的功率等于

$$w = \int_{t_0}^{t} p\,dt \qquad (1-8)$$

第二节 电路元件

电路仅仅是元件之间的相互结合。我们发现电路中存在有两种元件：无源元件和有源元件。有源元件能够产生能量而无源元件却不能，无源元件有电阻、电容和电感器等。最重要的有源元件是通常向与它们相连的电路释放能量的电压和电流源。

独立源

一个理想的独立源是产生完全独立于其它电路变量的特定电压或电流的有源元件。一个独立电压源是一个二端口元件，如一个电池或一台发电机，它们在其端部维持某个特定的电压。该电压完全独立于流过元件的电流，在其端部具有u伏电压的电压源的符号如图1－4（a）所示，极性如图所示，它表明a端比b端高u伏。如果u>0，那么a端的电位高于b端，当然，如果u<0，反之亦然。

在图1－4（a）中，电压u可以是随时间而变化，或者可以是恒定的，在这种情况下我们可能把它标为U，对于恒定电压源我们通常使用另一种符号，例如在两端只有U伏电压的电池组，如图1－4（b）所示。在恒定源的情况下我们可以交替地使用于图1－4（a）或图1－4（b）。

我们可能已经注意到这一点，即图1－4（b）中的极性标号，是多余的因为我们可以根据长天线的位置符，确定电池极性。

一个独立电流源是二端元件在两端之间特定的电流流过，该电流完全独立于元件两端的电压，一个独立电流源的符合如图1－5所示。图中i是特定电流，该电流的方向由箭头标明。

独立源通常指的是向外电路释放功率而非吸收功率，因此如果u是电源两端的电压而电流i直接从其正端流出，那么该电源正在向对电路释放功率，由式p＝ui算出。否则它就在吸收功率。例如图1－6（a）中电池正在向外电路释放功率24w，在图1－6（b）中，电池就在充电情况，吸收功率24w。

受控源

一个理想的受控源是一个有源元件，它的电源量是由另外一个电压和电流所控制。

受控源通常用菱形符号表明，如图1－7所示。由于控制受控源的控制量来自于电路中其他元件的电压或电流，同时由于受控源可以是电压源或电流源。由此可以推出四种可能的受控源类型，即

电压控制电压源（VCVS）

电流控制电压源（CCVS）

电压控制电流源（VCCS）

电流控制电流源（CCCS）

受控源在模拟诸如晶体管、运算放大器以及集成电路这些元件时是很有用的。

应该注意的是：一个理想电压源（独立或受控）可向电路提供以保证其端电压为规定值所需的任意电流，而电流源可向电路提供以保证其电流为规定值所必须的电压。还应当注意的是电源不仅向电路提供功率，他们也可从电路吸收功率。对于一个电压源来说，我们知道的是由其提供或所获得的电压而非电流，同理，我们知道电流源所提供的电流而非电流源两端的电压。

Exercises（12）

在下面进行的工作中我们要研究的简单电路元件可以根据流过元件的电流与元件两端的电压的关系进行分类。例如，如果元件两端的电压正比于流过元件的电流，即u＝ki，我们就把元件称为电阻器。其他的类型的简单电路元件的端电压正比于电流对时间的导数或正比于电流关于时间的积分。还有一些元件的电压完全独立于电流或电流完全独立于电压，这些是独立源。此外，我们还要定义一些特殊类型的电源，这些电源的电压或电流取决于电路中其他的电流或电压，这样的电源将被称为非独立源或受控源。

第三节 欧姆定律

用来模拟材料阻流性能的电路元件是电阻，电阻是最简单的无源元件。

德国物理学家乔治西蒙欧姆（1787～1854），1826年根据实验提出电阻的电流——电压关系，为此而享誉世界。这一关系被称为欧姆定律。

欧姆定律表明电阻器两端的电压正比于流过电阻器的电流。这个比例常值就是该电阻器以欧姆为单位的电阻值。电阻器的电路符号如图1－8所示。

对于所示的电流和电压，欧姆定律就是

$$u(t) = R \cdot i(t) \qquad (1-9)$$

把方程（1—9）重新整理为 $R = \dfrac{u(t)}{i(t)}$ 的形式，我们将看到：

1ohm＝1V/A

用来表示欧姆定律的方程（1—9）是一个直线方程，由于这个原因，电阻就被称为线性电阻。u（t）相对于i（t）而变化的图形，如图1—9所示。它是一条通过原点斜率为R的直线，显然，当u（t）与i（t）的比值对于所有的i（t）都为一恒定值时，其唯一可能的图形就是一条直线。

对于不同端部电流而具有不同电阻的电阻器被称为非线性电阻器。对于这种电阻器，电阻就等于器件中所流动的电流的函数。非线性电阻器的一个简单的例子是白炽灯。这种器件的一个典型的伏——安特性曲线如图1－10所示。图中我们看到其图形不再是一条直线。由于它不是一个恒值，对于包含有非线性的电路的分析显得更加困难。

事实上，所有实际电阻器都是非线性的，因为所有电阻器的电气性能会受到例如温度等的环境因素所影响。不过很多材料在规定的工作范围内非常接近理想线性电阻。

专注于这种类型的元件并且仅仅把它们称为电阻器。

由于R值可以从0变化到无穷大，所以对我们来说研究两种极限可能的R值很重要的。具有R＝0的元件称为短路，如图1－11（a）所示。对于短路来说

$$u = R \cdot i \qquad (1-10)$$

上式显示电压为0而电流可以是任何值。实际上，短路通常是指一段假设为理想导体的连接导线。于是，短路就是电阻近似为0的电路元件。

类似地，具有R＝∞的元件被称为开路，如图1－11（b）所示，对于开路来说

$$i = \lim_{R \to \infty} \frac{u}{R} \qquad (1-11)$$

上式表明电流为0，虽然电压可以是任意值。于是，开路就是电阻近似为无穷大的电路元件。

在电路分析中另一个有用的重要电量，被称为电导，定义为

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u} \qquad (1-12)$$

电导是对某一元件传导电流的容易程度的一种度量，电导的单位是西门子。

Exercise（13）

必须强调的是线性电阻器是一个理想的电路元件；它是物理元件的数学模型。我们可以很容易地买到或制造电阻器，但很快我们发现这种物理元件只有当电流、电压或者功率处于特定范围时其电压——电流之比才是恒定的，并且这个比值也取决于温度以及其它环境因素。我们通常应当把线性电阻器仅仅称为电阻器。只有当需要强调元件性质的时候才使用更长的形式称呼它。

而对于任何非线性电阻器我们应当始终这么称呼它，非线性电阻器不应当必然地被视为不需要的元件。

第四节 基尔荷夫定律

网络变量之间可能存在有很多相互关系。一些关系是由于变量的性质所决定。一些不同类型的关系是由于某些特定类型的网络元件对变量的约束而产生的。另一类关系是介于相同形式的一些变量之间的关系，这些变量是由于网络结构即网络的不同元件相互连接的方式而产生的。这样一种关系就被说成是基于网络拓扑结构的关系。基尔荷夫电流和电压定律是基于网络连接特性的定律，这些定律不涉及元件本身特性。

基尔荷夫电流定律

基尔荷夫电流定律基于电荷守恒定律，电荷守恒定律要求一个系统中电荷的代数总和不变。

基尔荷夫电流定律（KCL）表明流进一个节点（或一个闭合边界）的电流的代数和为0，从数学上来说，KCL表明：

$$\sum_{n=1}^{N} i_n = 0 \qquad (1-13)$$

式中N为连接到节点的支路数而i_n是流入（或流出）节点的第n条支路电流。

根据这个定律，流入一个节点的电流可以认为是“＋”电流，而流出节点的电流可以看成是“－”电流。

考虑图1－12的节点，应用KCL得到：

$$i_1 + \left(-i_2\right) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0 \quad (1-14)$$

由于电流i_1，i_3，i_4流入节点，而电流i_2和i_5流出节点，重新整理方程（1－14），我们可以得到：

$$i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5 \qquad (1-15)$$

KCL定律的另一种形式是：流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。

让我们注意KCL定律也可以应用于闭合边界。这可以被视为定律的广义应用情形。这是由于节点可以被看成是由某个闭合面收缩成一点而形成的。在二维情况下，一个闭合的界面等同于一个闭合的线路。图1－13所示的电路就是一个典型的例子。流入闭合面的总电流等于流出闭合面的总电流。

基尔荷夫电压定律（KVL）

基尔荷夫电压定律基于能量守恒原理。

基尔荷夫电压定律（KVL）表明环绕闭合线路（或回路）的电压的代数和为0，从数学上来说，KVL表达为：

$$\sum_{m=1}^{M} u_m = 0 \qquad (1\text{–}16)$$

式中M是回路电压总数而且u_m是第m个电压。

为了解释KVL，让我们研究图1－14所示的电路。每个电压的符号就是当我们环绕回路时首先遇到的端部的极性。我们可以从任何一个电压开始并且可以顺时针或逆时针方向环绕回路。假设我们从电压源开始并如图所示顺时针环绕回路，那么电压将是－u_1、＋u_2、＋u_3、－u_4以及＋u_5，按照这个顺序，举例说，当我们到达支路3时，我们首先遇到正极，于是，得到＋ u_3，对于支路4，我们首先遇到负极，于是，得到－u_4。因此，应用KVL，得出：

$$-u_1 + u_2 + u_3 + (-u_4) + u_5 = 0 \quad (1-17)$$

重新整理以上各项，得到：

$$u_2 + u_3 + u_5 = u_1 + u_4 \qquad (1-18)$$

上式可以解释为：电压降之和等于电压升之和。

这是KVL定律的另一种形式，注意如果我们逆时针环绕回路结果将是u_1、－u_5、＋u_4、－u_3以及－u_2，结果与前面相同，除了符号相反外。因此，方程（1－16）和方程（1－18）是一样的。

Exercise（14）

如果一个电路有两个或多个独立源，求出具体变量值（电流或电压）的一种方法是使用节点分析法或网孔分析法。另一种方法是求出每个独立源对变量的作用然后把它们进行叠加。而这种方法被称为叠加法。叠加法原理表明线性电路某个元件两端的电压（或流过元件的电流）等于每个独立源单独作用时该元件两端的电压（或流过元件的电流）的代数和。

第五节 基本分析方法

在已经了解了电路理论的基本理论（欧姆定律和基尔荷夫定律）之后，我们准备应用这些定律导出电路分析的两个很有用的方法：节点分析法以及网孔分析法。前者基于基尔荷夫电流定律（KCL）的有序应用，后者基于基尔荷夫电压定律（KVL）的有序应用。根据这一节所导出的这两种方法，我们就能够通过列出一套有关方程然后求解所需的电压和电流来分析几乎任何电路。求解联立方程的一种方法涉及克莱姆法则，这个法则使我们可以把电路变量当作行列式系数来计算。

节点分析法

对于很多网络来说，选择节点电压（作为电路变量）是一个很方便的做法。由于电压被定义为存在于两个节点之间的电压，所以我们可以方便地选择网络中的一个节点作为参考节点或基准节点，然后和其它节点的电压或电位差相联系。每个非参考节点的电压相对于参考节点来说被定义为该节点电压。通常的做法是选择极性时使节点的电压相对于参考节点为正。对于一个包含有N个节点的电路而言，将会有N－1个节点电压，当然，如果存在电压源的话，他们中的一些可能是已知的。

我们通常选择那个连接有最多条支路的节点作为参考节点。许多实际的电路是建立在金属底版或底盘上，并且通常有很多个元件连接到底盘上，然后这个底盘通常接地。这个底盘于是就可以被称为地，并在逻辑上被选作参考节点。由于这个原因，参考节点通常指地。于是，参考节点的电位就是地电位或零电位，其它节点可以被认为是处于零电位之上的某个电位。

应用KCL我们将得到与节点电压有关的方程式。显然，连接有很多元件的节点被选为参考节点时，将结果方程进行简化是可以做到的。然而，我们应该知道，这并不是选择参考节点时的唯一标准，但它通常是最常用的标准。

在图1－15所示的网络中，存在有3个节点，数目如图所示。由于有4条支路连接到节点3，所以我们把它选作参考节点，用所示的连地符号来标明。

节点1和节点3之间的电压表明为u1，而u2定义为节点2和参考节点之间的电压。有这两个电压就够了，其它任意两个节点之间的电压可以根据这两个电压求出，例如，节点1相对于节点2的电压是（u1－u2）。

现在我们必须把基尔荷夫电流定律应用于节点1和节点2，我们可以通过使离开节点穿过n个电导的电流等于流入节点的总电流来做到这一点。于是，有：

$$0.5u_1 + 0.2(u_1 - u_2) = 3$$

即 $$0.7u_1 + 0.2u_2 = 3 \qquad (1\text{–}19)$$

在节点2，我们得到

$$u_2 + 0.2(u_2 - u_1) = 2$$

即 $$-0.2u_1 + 1.2u_2 = 2 \qquad (1\text{–}20)$$

解方程（1－19）和（1－20）求得未知的节点电压u_1和u_2。于是电路中的任何电流和功率可以被求得。

节点分析法的步骤为：

1. 选择一个节点作为参考节点，将剩下的n－1个节点的电压定为u_1，u_2……u_{n-1}。

2. 将KCL定律应用于n－1个非参考节点，应用欧姆定律，根据节点电压来表示支路电路电流。

3. 求解所得到的联立方程得到未知的节点电压，然后求解其它需要的变量。

网孔分析法

网孔分析法为电路分析提供了另一种通用的方法，这种方法使用网孔电流作为电路变量。使用网孔电流代替元件电流作为电路变量很方便，因为它可以减少要求求解的联立方程的个数。让我们重温关于回路是一个经过的节点都相异的闭合线路，而网孔是一个其中不包含任何回路的概念。

节点分析法应用KCL来求得某个给定电路的未知电压，而网孔分析法应用KVL来求得未知电流。由于网孔分析法仅适用于平面电路，所以网孔分析法不如节点分析法那样通用。平面电路是一个平面。平面电路是一种可以画在平板上而其中没有相互交叉的支路的电路。

否则它就是非平面电路。一个电路可能会有交叉的支路但仍然算是平面电路如果这个电路可以被重新画过使得其中没有交叉支路的话。一个网孔是一个其中不包含任何回路的回路。

例如，在图1－16中，电路中有两个网孔，在一个给定电路中流过网孔的电流被称为网孔电流。如果我们把题目中左手的网孔标为网孔1，那么我们就可以建立起这个网孔顺时针方向流动的网孔电流i_1，网孔电流用一个几乎闭合的弯曲箭头符号标明并画在对应的网孔内，如图1－16所示。在剩下的网孔中建立网孔电流i_2，方向也是顺时针。虽然网孔电流的方向是任意的，但我们应始终选择网孔电流为顺时针方向，因为这样做将由于对称法使方程中出现的错误减少到最少程度。

使用网孔电流的另一个突出优点是因为它满足基尔荷夫电流定律，如果某个网孔电流流入一个给定的节点，显然它也会流出那个节点。

把KVL应用于每个网孔，我们得到：

$$-42+6i_1+3(i_1-i_2)=0$$

$$3(i_2-i_1)+4i_2-10=0$$

$$9i_1-3i_2=42 \qquad (1-21)$$

$$-3i_1+7i_2=10 \qquad (1-22)$$

我们注意到方程（1—21）中i_1的系数就是网孔1的电阻总和，而电流i_2的系数是网孔1和网孔2的共有电阻的负值。现在我们看到方程（1—22）也是同样情况。

注意到支路电流不同于网孔电流，除非网孔是独立网孔。

网孔分析法的步骤是：

1. 把几个网孔的网孔电流定为i_1，i_2……i_n；

2. 将KVL应用于几个网孔的每个网孔。应用欧姆定律根据网孔电流来表达各个电压；

3. 求解所列的几个联立方程求得网孔电流，然后求出其它所需的变量；

Exercise(15)

相电压与相电流之比等于电路的阻抗，符号为字母Z，阻抗是一个具有量纲为欧姆的复数量。阻抗不是一个相量，因此不能通过把它乘以 $e^{j\omega t}$ 并取其实部把它转换成时域形式。但是，我们把电感器看作是通过其电感量L表现为时域形式而通过其阻抗 $j\omega L$ 表现为频域形式，电容在时域里为电容量C而在频域里为 $\frac{1}{j\omega c}$ ，阻抗是某种程度上的频域变量而非时域变量。

第六节 正弦交流电路分析和三相电路

电路元件之间的相量关系

通过建立三个无源元件的相电压和相电流之间的关系，我们可以进行正弦稳态分析的简化工作。电阻器为我们提供了最简单的例子。在时域范围内，如图1－17（a）所示，如果流过电阻器R的电流是 $i = I_m \cos(\omega t + \phi)$ ，电阻器两端的电压由

欧姆定律得出：

$$u_t = R_t(t) = RI_m \cos(\omega t + \phi) \qquad (1-23)$$

此电压的相量形式为：

$$\dot{U}_m = RI_m \angle \phi = R\dot{I}_m \qquad \dot{U} = R\dot{I} \qquad (1-24)$$

图1－17（b）显示在相量方面电阻器中电压——电流之间的关系仍然反映欧姆定律，正如时域中一样。在方程（1－24）中我们应当注意电压和电流之间的是关系相量之间的关系，正如图1－18中的相量图所示。

对于电感器L，假设流过它的电流是

$$i = I_m \cos(\omega t + \phi)$$

电感器两端的电压是

$$u = L\frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t + \phi) \qquad (1-25)$$

电压可以写成

$$u = \omega L I_m \cos(\omega t + \phi + 90^\circ) \qquad (1-26)$$

把它转换成相量形式：

$$\dot{U}=\omega LI_m e^{j(\phi+90^\circ)}=\omega LI_m e^{j\phi}e^{j90^\circ}=\omega LI_m\angle\phi e^{j90^\circ}\quad(1-27)$$

但由于 $I_m\angle\phi=\dot{I}, e^{j90^\circ}=j$，于是

$$\dot{U}=j\omega L\dot{I}\qquad(1-28)$$

上式显示电压的幅度I_m为而相位为$\varphi+90$，电压和电流的相位相差90度，特别地，电流滞后电压90度。图1－19显示了电感器的电压——电流之间的关系。图1－20显示了其相量图。

对于电容器C，假设其两端的电压是 $u = U_m \cos(\omega t + \phi)$ ，流过电容器的电流为：

$$i = C\frac{du}{dt} \qquad (1-29)$$

按照我们在电感器中所采用的相同的步骤，我们求得

$$\dot{I} = j\omega C\dot{U} \qquad (1-30)$$

上式显示电压和电流的相位相差90度，特别地，电流超前电压90度，图1－21显示了电容器的电压——电流之间的关系，图1－22显示了其相量图。

正弦电路分析

我们还知道欧姆定律和基尔荷夫也适用于交流电路。电路分析的简化方法（例如节点分析法、网孔分析法、戴维南定理等）也应用于分析交流电流。由于这些方法已经在直流电路中介绍过了，我们在这里主要介绍交流电路分析的步骤。

分析交流电路通常需要三个步骤：

1. 把电路转换成时域或频域形式
2. 利用电路方法（节点分析法、网孔分析法、叠加原理等）解决问题
3. 把得到的相量转换成时域形式

平衡三相电压

典型的三相系统由三个电源构成，这三个电压源通过三根或四根导线（或输出线）与负载相连。三相系统等效于三个单相电路。电压源可以连接成Y形如图1－23（a）所示或连接成△形如图1－23（b）所示。

现在让我们研究图1－23（a）所示的Y形连接的电压。电压U_{an}，U_{bn}和U_{cn}分别介于a线与中线n之间，b线与中线n之间以及c线与中线n之间，这些电压被称为相电压。如果电压源具有相同的幅值和频率ω并且相互之间相位差120度，这些电压就被说成是平衡的。这表明：

$$\dot{U}_{an}+\dot{U}_{bn}+\dot{U}_{cn}=0 \qquad (1-31)$$

$$\left|\dot{U}_{an}\right|=\left|\dot{U}_{bn}\right|=\left|\dot{U}_{cn}\right| \qquad (1-32)$$

由于三相电压彼此之间相位相差120度，所以只有两种可能的组合。一种可能情况如图1－24（a）所示而在数学上可表达为：

$$\dot{U}_{an}=U_p\angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_{bn}=U_p\angle -120^\circ$$

$$\dot{U}_{cn}=U_p\angle 240^\circ$$

上式中Up是有效值。这种情况被称为abc次序或正序，在这种相序中，U_{an}超前U_{bn}，U_{bn}接着超前U_{cn}。另外一种可能的情况如图1－24（b）所示，这种情况被称为acb次序或负序（反序），对于这种相序， Uan超前Ucn， Ucn接着超前Ubn。相序就是每个电压经过其各自幅值的时间顺序。相序取决于相量图中相量经过一个固定点的顺序。相序在三相电力分配中是很重要的。它决定了与电源相连的一台电动机的转动方向。

如图发电机的连接一样，三相负载可以被连接成Y形或△形，这取决于最终的应用，图1－25（a）显示了Y形连接的负载，而图1－25（b）显示了△连接的负载。图1－25（a）的中线也可能没有，这取决于系统是四线还是三线的（当然，对于△连接来说中线连接在拓扑结构上来说是不可能的）。Y形或△形连接的负载如果负载阻抗在数值上或在相位上不相等，我们就说它是不平衡的，平衡负载指的是相阻抗在数值上和相位上相等的负载。

由于三相电源和三相负载都可以连接成Y形或△形，所以我们有四种可能的连接：Y—Y连接（即Y连接电源和Y连接负载）；Y－△连接；△－△连接，△－Y连接。

在这里要适时地提出这一点：平衡△形连接的三相负载比起平衡Y形连接的负载更为常用。这是由于△形连接时可以方便地从△形连接的每一相负载上增加或减少负载。而对于Y形连接负载做到这一点很困难，因为中点不易接近，另一方面，如果三相电压稍有不平衡就会在三角形连接的网孔中产生循环电流，因此实际情况中三角形连接的电源并不常见。

Exercises(16)

无论是星型连接的电源还是三角形连接的电源都有重要的实际应用意义。星型连接的电源用于长距离电力传输，此时电阻损耗(I^2R)将达到最小。这是由于星型连接的线电压是三角形连接的线电压的$\sqrt{3}$倍，于是,对于相同的功率来说，三角型连接的线电流是星形连接的线电流的$\sqrt{3}$倍。三角形连接的电源使用在根据三相电源而需要的三个单相电路中。这种从三相到单相的转变用在住宅布线中因为家用照明和设备使用单相电源。三相电源用在需要大功率的工业布线中。在某些应用场合，无论负载是星形连接还是三角形连接并不重要。