

第4章 交流电机的定子绕组、 磁动势及感应电动势

4.1 交流电机的定子绕组

4.2 绕组的磁动势

4.3 绕组的感应电动势

思考题与习题

4.1 交流电机的定子绕组

4.1.1 三相交流绕组的基本要求和分类

1. 三相交流绕组的基本要求


对三相交流绕组的基本要求如下：

(1) 每相绕组的阻抗要求相等，即每相绕组的匝数、形状都是相同的。

(2) 在导体数目一定的情况下，力争获得较大的电动势和磁动势。


(3) 电动势和磁动势中的谐波分量应尽可能小，电动势和磁动势的波形力求接近正弦波。

(4) 对基波而言， 三相电动势和磁动势必须对称。

(5) 端部连线尽可能短， 以节省用铜量。 

(6) 绝缘性能可靠， 制造、 维修方便。

2. 三相交流绕组的分类

三相交流绕组按照槽内元件边的层数分为单层绕组和双层绕组。单层绕组按连接方式不同可分为等元件、链式、交叉式和同心式绕组等；双层绕组则分为双层叠绕组和双层波绕组。 

单层绕组与双层绕组相比，电气性能稍差，但槽利用率高，制造工时少，因此小容量电动机中($P_N \leq 10\text{kW}$)一般都采用单层绕组。

3. 交流定子绕组的一些基本量 ψ

为了便于分析三相绕组的排列和连接规律，必须先了解一些与交流绕组有关的基本量。

1) 电角度 ψ

电机圆周的几何角度恒为 360° ，这称为机械角度。从电磁观点来看，若电动机的极对数为 p ，则每经过一对磁极，磁场就变化一周，相当于 360° 电角度。因此，电动机圆周按电角度计算为 $p \times 360^\circ$ ，即

$$\text{电角度} = p \times \text{机械角度} \quad (4.1.1)$$

2) 槽距角 α

相邻两个槽之间的电角度称为槽距角 α 。因为定子槽在定子内圆上是均匀分布的，所以若定子槽数为 Z_1 ，电动机极对数为 p ，则

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} \quad (4.1.2)$$

3) 每极每相槽数 q

每一个极下每相所占有的槽数称为每极每相槽数 q ，若绕组相数为 m_1 ，则

$$q = \frac{Z_1}{2m_1p} \quad (4.1.3)$$

若 q 为整数，则称为整数槽绕组；若 q 为分数，则称为分数槽绕组。

4) 相带

在感应电动机中，一般将每对磁极下的导体平均分给各相，每相绕组在每个极面下所连续占有的宽度(用电角度表示)称为相带。因为每个磁极占有的电角度是 180° ，所以对三相绕组而言，每相占有 60° 的电角度，称为 60° 相带。由于三相绕组在空间彼此要相距 120° 电角度，因而相带的划分沿定子内圆应依次为 U_1 、 W_2 、 V_1 、 U_2 、 W_1 、 V_2 ，如图4.1.1所示。这样只要掌握了相带的划分和线圈的节距，就可以掌握绕组的排列规律。

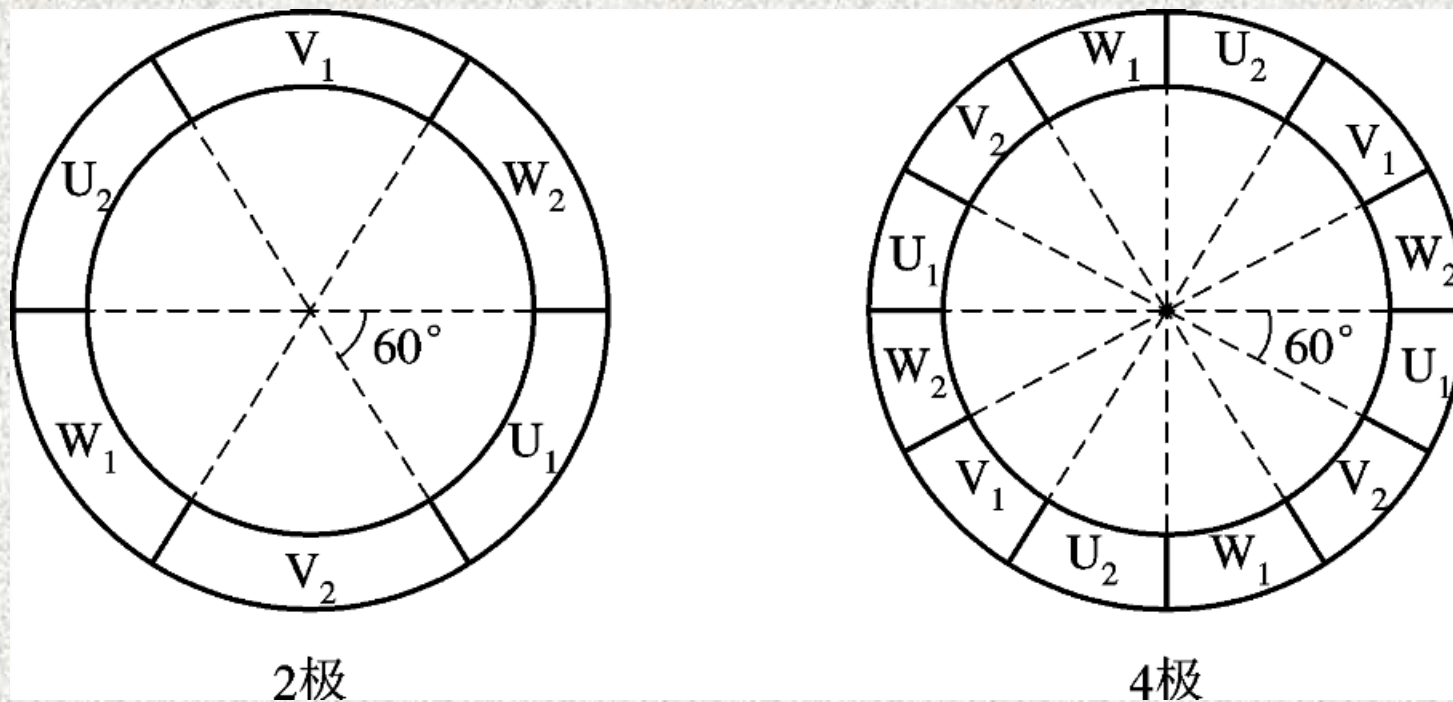


图4.1.1 60° 相带三相绕组

单层链式绕组是由形状、几何尺寸和节距都相同的线圈连接而成，就整体外形来看，形如长链故称为链式绕组。

当 $2p=2$ ， $q=1$ 是一种最简单的情况，定子铁心内圆上共有 $Z_1=2m_1pq=6$ 个槽，每个相带中只有一个槽，其中 U_1 、 U_2 的线圈边构成一相绕组， V_1 、 V_2 和 W_1 、 W_2 构成另外两相绕组。图4.1.2为绕组展开图。

当 $2p=4$ ， $q=1$ 时定子槽数 $Z_1=12$ ，每对极下有6个槽，每对极下三相绕组的排列完全相同，相当于把图4.1.2的情况重复一次，这样每相绕组就有两个线圈，它们可以并联联接，也可以串联联接。图4.1.3是串联联接的情况。

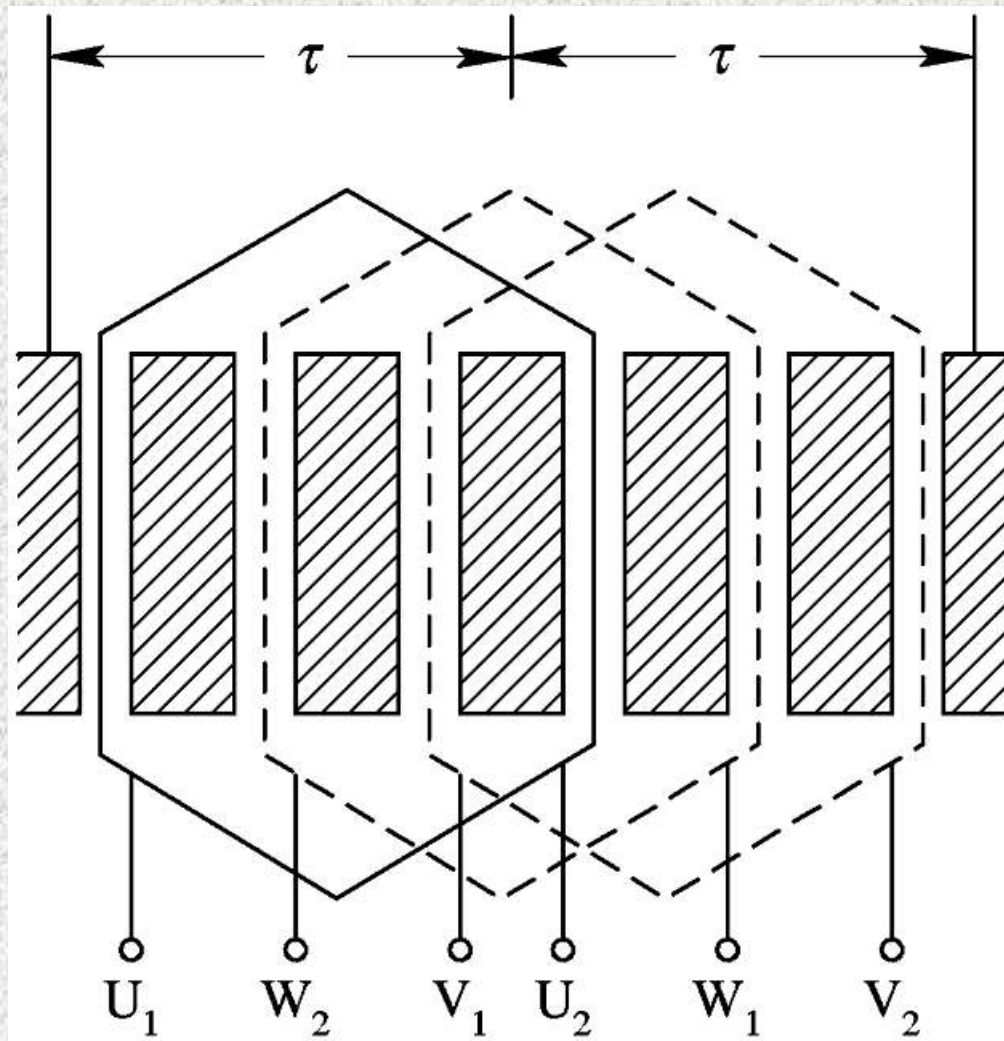


图4.1.2 三相2极交流绕组展开图

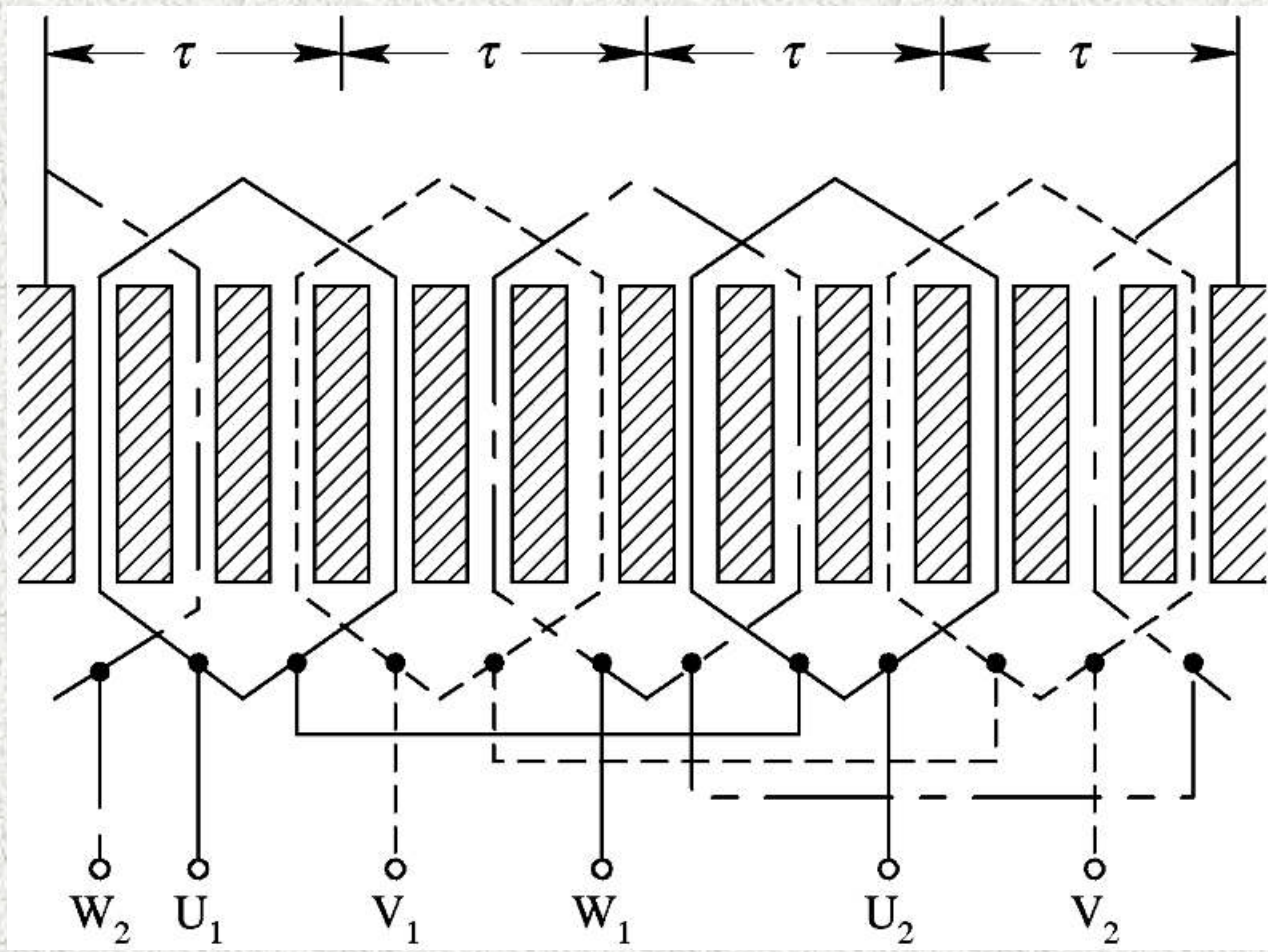


图4.1.3 三相4极绕组展开图

下面以 $Z_1=24$ ， $2p=4$ 的三相感应电动机定子绕组为例，来说明链式绕组的构成。

[例4.1.1] 设有一台极数 $2p=4$ 的电动机，定子槽数 $Z_1=24$ ，三相单层链式绕组的电机，说明单层绕组的构成原理并绘出绕组展开图。

解 (1) 计算极距 τ 、每极每相的槽数 q 和槽距角 α ：

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$q = \frac{Z_1}{2m_1p} = \frac{24}{2 \times 3 \times 2} = 2$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$

2) 分相。将槽依次编号，绕组采用 60° 相带，则每个相带包含两个槽，列表4.1.1中。

表4.1.1 相带槽号对应表

相带 槽号	U ₁	W ₂	V ₁	U ₂	W ₁	V ₂
第一对极	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10	11, 12
第二对极	13, 14	15, 16	17, 18	19, 20	21, 22	23, 24

(3) 构成一相绕组，绘出展开图。将属于U相的导体2和7，8和13，14和19，20和1相连，构成四个节距相等的线圈。当电动机中有旋转磁场时，槽内导体将切割磁力线而感应电动势，U相绕组的总电动势将是导体1、2、7、8、13、14、19、20的电动势之和(相量和)。四个线圈按“尾-尾”、“头-头”相连的原则构成U相绕组，其展开图如图4.1.4所示。采用这种连接方式的绕组称为链式绕组。

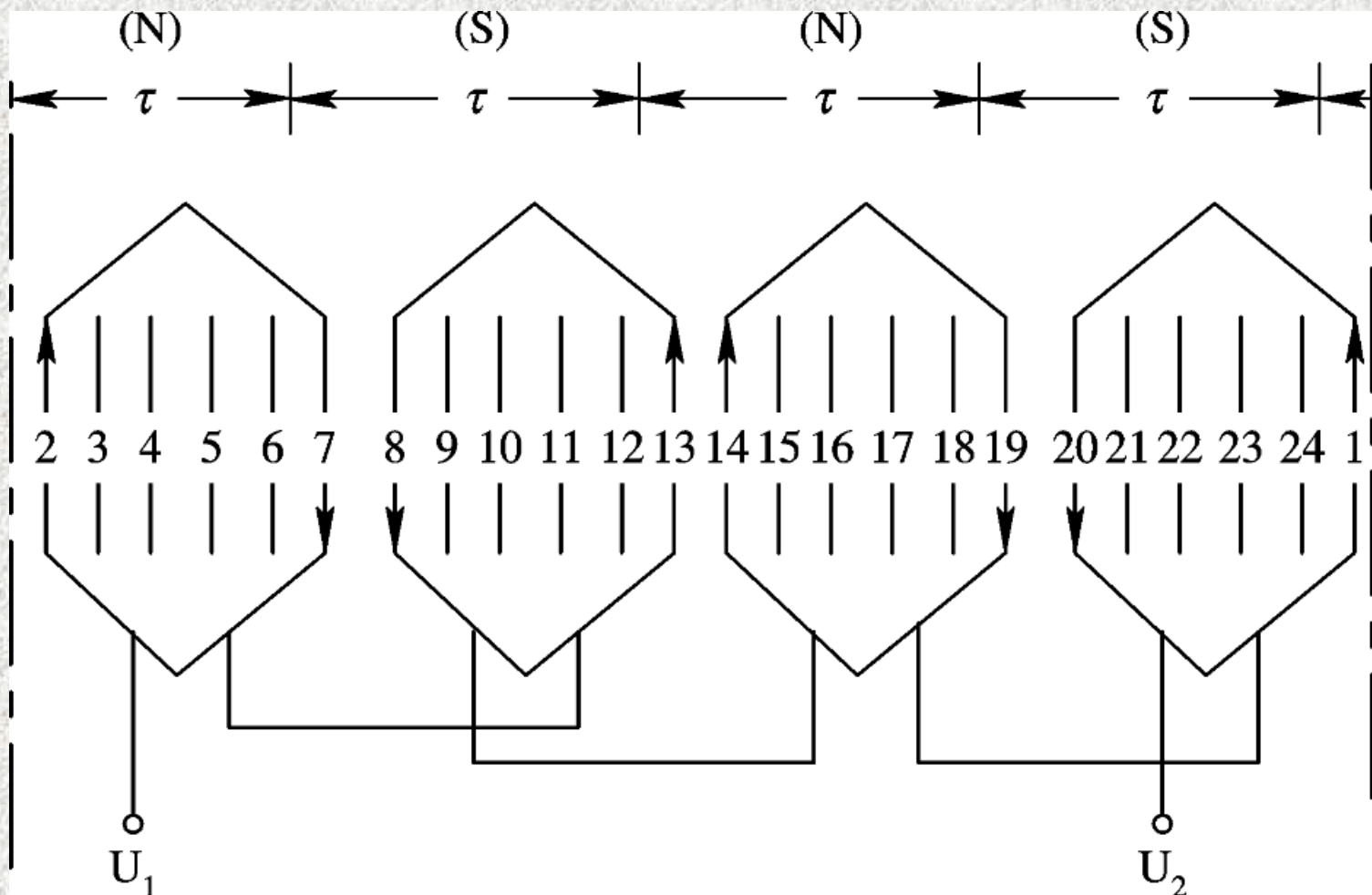


图4.1.4 单层链式U相绕组展开图

用同样的方法，可以得到另外两相绕组的连接规律。V、W两相绕组的首端依次与U相首端相差 120° 和 240° 空间电角度。图4.1.5为三相单层链式绕组的展开图。



链式绕组主要用于 $q=2$ 的4、6、8极小型三相异步电动机中，具有工艺简单、制造方便、线圈端部连线少、省铜等优点。

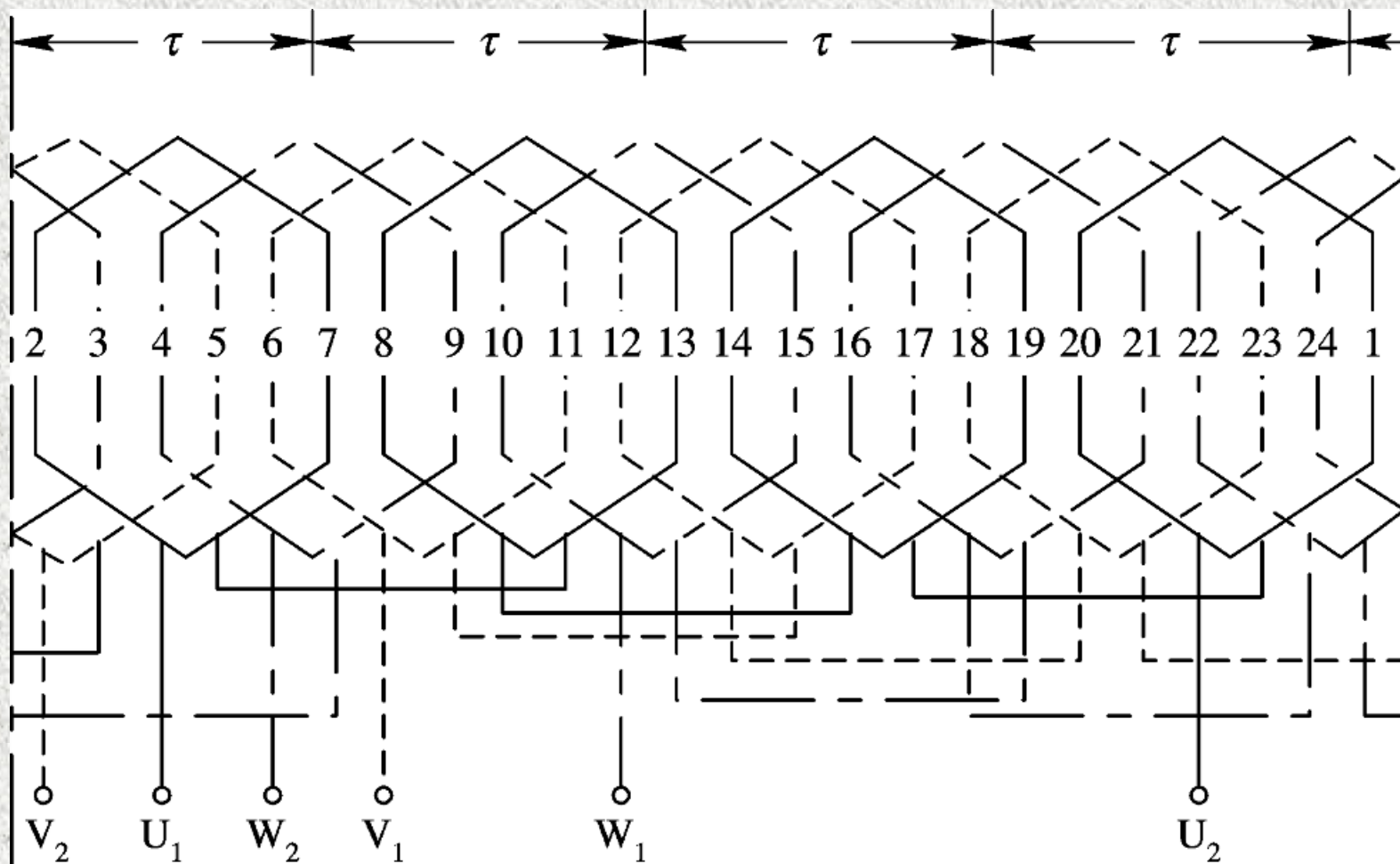


图4.1.5 三相单层链式绕组的展开图

2. 单层交叉式绕组

交叉式绕组是由线圈个数和节距都不相等的两种线圈组构成的，同一线圈组中各线圈的形状、几何尺寸和节距均相等，各线圈组的端部都互相交叉。

【例4.1.2】 设一台交流电动机，极数 $2p=4$ ，定子槽数 $Z_1=36$ ，说明三相单层交叉式绕组的构成原理并绘出展开图。

解 (1) 计算极距 τ 、每极每相的槽数 q 和槽距角 α ：

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

$$q = \frac{Z_1}{2m_1p} = \frac{36}{2 \times 3 \times 2} = 3$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

(2) 分相。将槽依次编号，绕组采用 60° 相带，则每极每相包含三个槽，相带与槽号的对应关系列于表4.1.2中。

表4.1.2 相带与槽号的对应关系（三相单层交叉式绕组）

相带 槽号	U1	W1	V1	U2	W2	V2
第一对极	1,2,3	4,5,6	7,8,9	10,11,12	13,14,15	16,17,18
第二对极	19,20,21	22,23,24	25,26,27	28,29,30	31,32,33	34,35,36

(3) 构成一相绕组，绘出展开图根据U相绕组所占槽数不同，把U相所属的每个相带内的槽导体分成两部分2—10，3—11构成两个节距 $y_1=8$ 的大线圈；1—30构成一个 $y_1=7$ 的小线圈。同理，20—28，21—29构成两个大线圈，19—12构成一个小线圈，形成两对极下依次出现两大一小的交叉布置。根据电动势相加的原则，线圈之间的联接规律是：两个相邻的大线圈之间应按“头—尾”相联，大、小线圈之间应按“尾—尾”、“头—头”规律相联。展开图如图4.1.6。这种联接方式的绕组称为交叉式绕组。

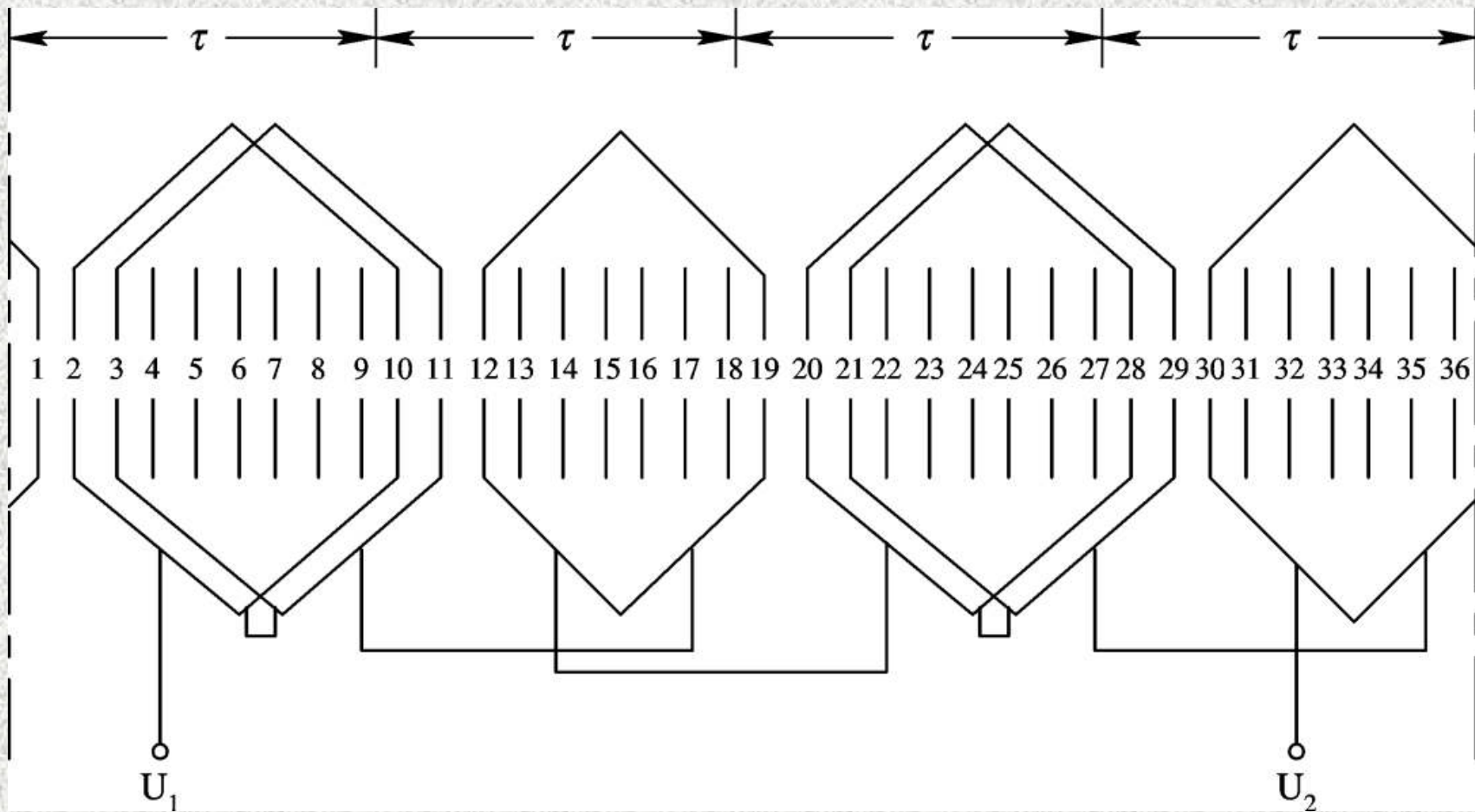


图4.1.6 单层交叉式U相绕组展开图

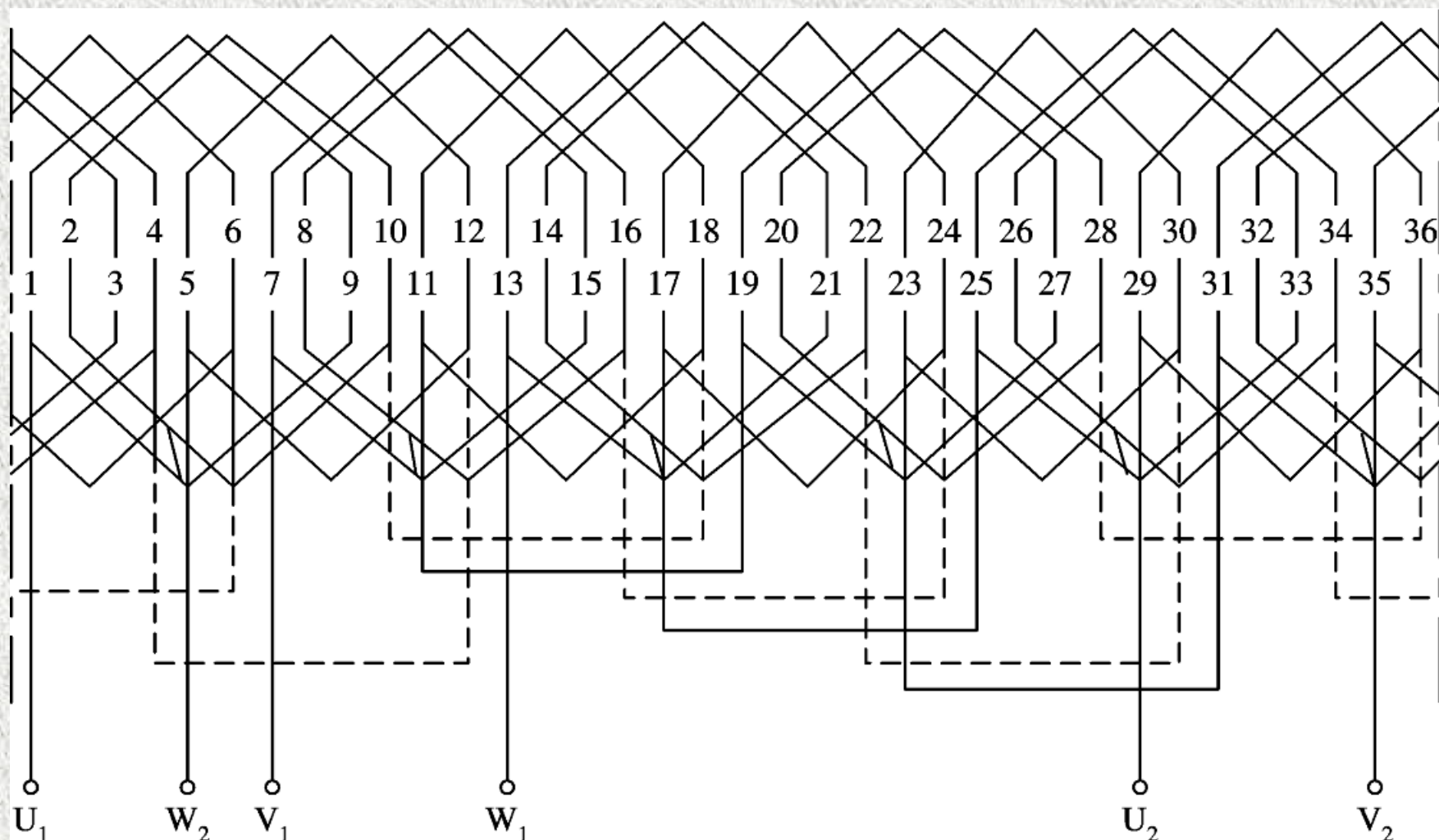


图4.1.7 三相单层交叉式绕组展开图

3. 单层同心式绕组

同心式绕组由几个几何尺寸和节距不等的线圈连成同心形状的线圈组所构成。

【例4.1.3】 设一台交流电动机，极数 $2p=2$ ，定子槽数 $Z_1=24$ ，说明三相单层同心式绕组的构成原理并绘出展开图。

解 (1) 计算极距 τ 、每极每相的槽数 q 和槽距角 α ：

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{2} = 12$$
$$q = \frac{Z_1}{2m_1p} = \frac{24}{2 \times 3 \times 1} = 4$$
$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} = \frac{1 \times 360^\circ}{24} = 15^\circ$$

(2) 分相。

由 $q=4$ 和 60° 相带的划分顺序可得如表4.1.3所示的相带与槽号的对应关系。

表4.1.3 相带与槽号的对应关系（同心式绕组）

相带	U1	W2	V1	U2	W1	V2
槽号	1,2,3,4	5,6, 7,8	9,10,11,12	13,14,15,16	17,18,19,20	21,22,23,24

(3) 构成一相绕组，绘出展开图。把U相的每一相带内的槽分成两半，3和14槽内的导体构成一个节距为11的大线圈，4和13槽内的导体构成一个节距为9的小线圈，把两个线圈串联组成一个同心式的线圈组，再把15和2、16和1槽内的导体构成另一个同心式线圈组。两个线圈组之间按“头接头、尾接尾”的反串联规律相连，得到U相同心式绕组展开图，如图4.1.8所示。

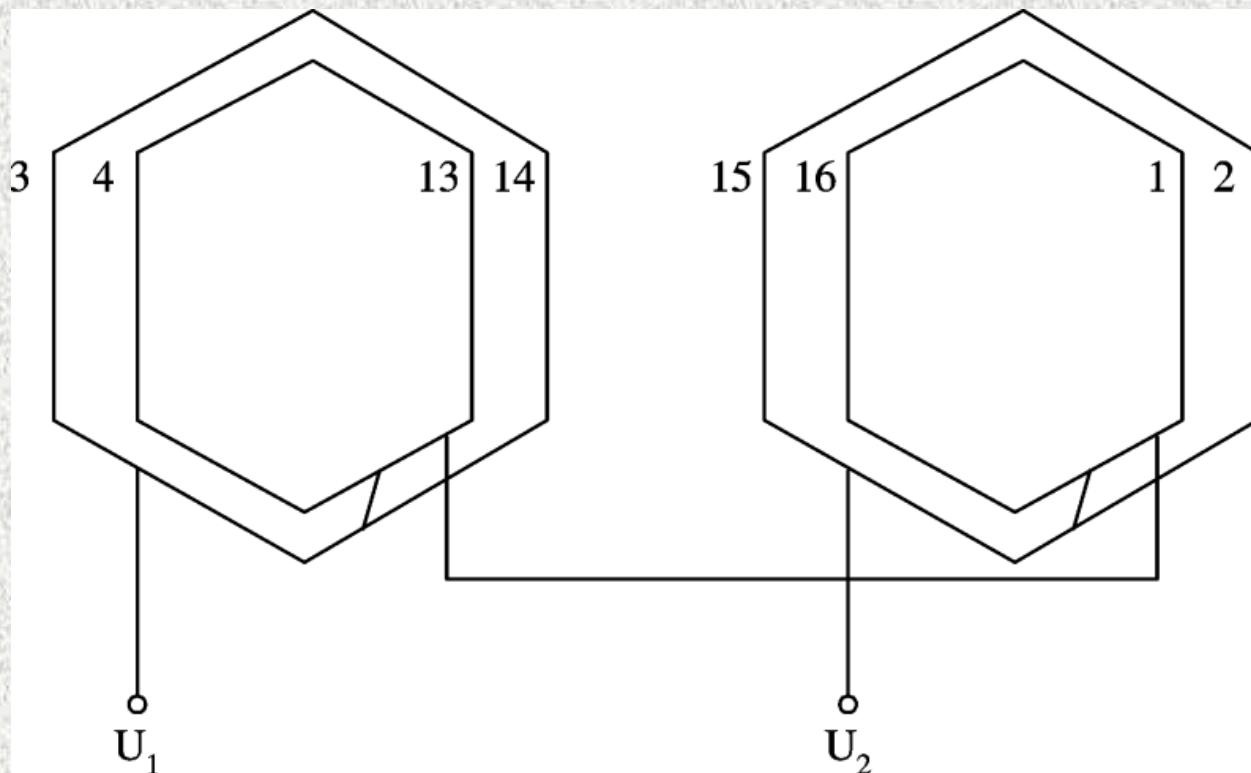


图4.1.8 同心式U相绕组的展开图

同心式绕组端部连接线长，适用于 $q=4、6、8$ 等偶数的两极小型三相感应电动机。 ❖


综上所述，单层绕组的线圈节距在不同形式的绕组中是不同的，但从电动势计算角度来看，每相绕组中的线圈电动势均是属于两个相差 180° 空间电角度的相带内线圈边电动势的相量和，因此它仍是整距绕组。单层绕组不宜用于大、中型电动机。

4.1.3 双层叠绕组

双层绕组每个槽内导体分作上、下两层，线圈的一个边在一个槽的上层，另一个边则在另一个槽的下层，因此总的线圈数等于槽数。

双层绕组按线圈形状和端部连接的方式不同分为双层叠绕组和双层波绕组，这里仅介绍双层叠绕组。

双层绕组相带的划分与单层绕组相同，现用一个具体例子说明双层叠绕组的构成。

【例4.1.4】 设一台交流电动机，极数 $2p=4$ ，定子槽数 $Z_1=24$ ，试绘出三相双层叠绕组展开图。 

解（1） 计算极距 τ 、每极每相的槽数 q 和槽距角 α ：

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$q = \frac{Z_1}{2m_1p} = \frac{24}{2 \times 3 \times 2} = 2$$

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z_1} = \frac{2 \times 360^\circ}{24} = 30^\circ$$

(2) 分相。由 $q=2$ 和 60° 相带的划分顺序可得如表4.1.4所示的相带与槽号的对应关系。🌿

表4.1.4 相带与槽号的对应关系（三相叠绕组）

相带 槽号	U ₁	W ₂	V ₁	U ₂	W ₁	V ₂
第一对极	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8	9, 10	11, 12
第二对极	13, 14	15, 16	17, 18	19, 20	21, 22	23, 24

(3) 构成一相绕组，绘出展开图。根据表4.1.4对上层线圈边的分相以及双层绕组的下线特点（一个线圈的有效边放在上层，另一个有效边放在下层）来放置线圈。如果1号线圈的一个有效边放在1号槽的上层，则另一有效边根据线圈节距 y_1 的大小放置在7号槽的下层边；2号线圈的一个有效边在2号槽的上层，则另一有效边应在 $2+6=8$ 号槽的下层。一个极面下属于U相的1、2两个线圈串联构成一个线圈组，再将第二个极面下属于U相的7、8两个线圈串联构成第二个线圈组。按照同样的方法，另两个极面下属于U相的13、14和19、20线圈分别构成第三、第四个线圈组。如此直至每极面下都有一个属于U相的线圈组，因此双层绕组的线圈组数和磁极对数相等。最后，根据电动势相加的原则把4个线圈组串联起来，组成U相绕组，如图4.1.9所示。

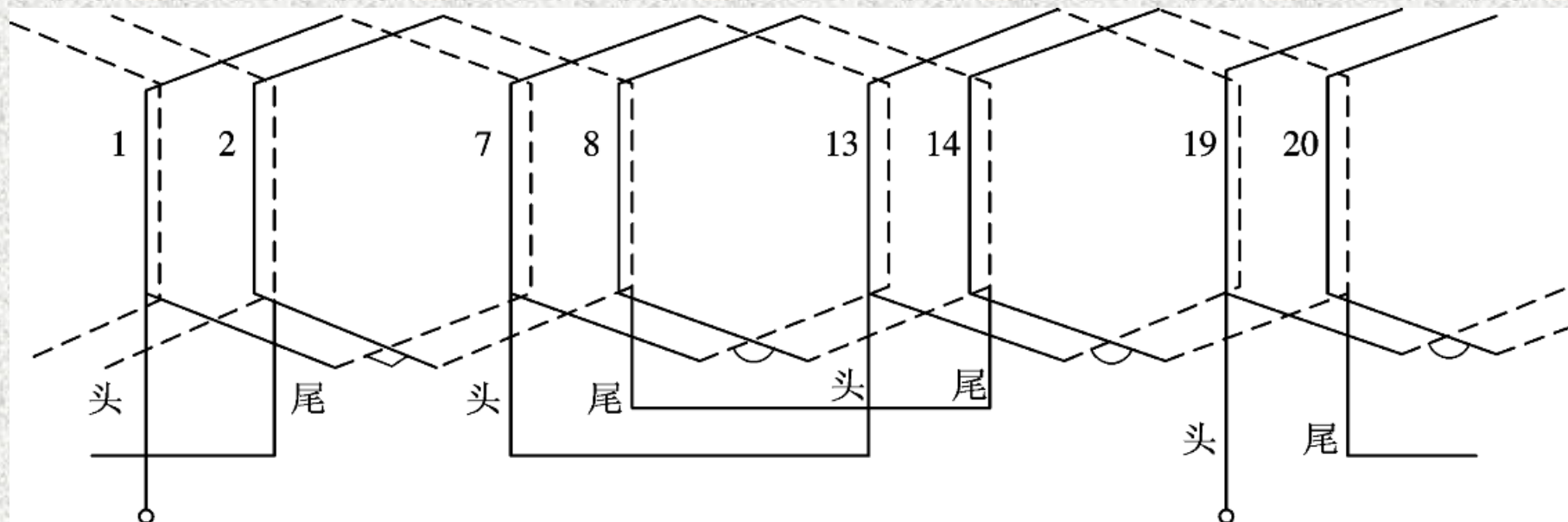


图4.1.9 三相叠绕组U相绕组展开图

其他两相绕组亦可按同样方法构成。图4.1.10是一个三相双层短距叠绕组的展开图。

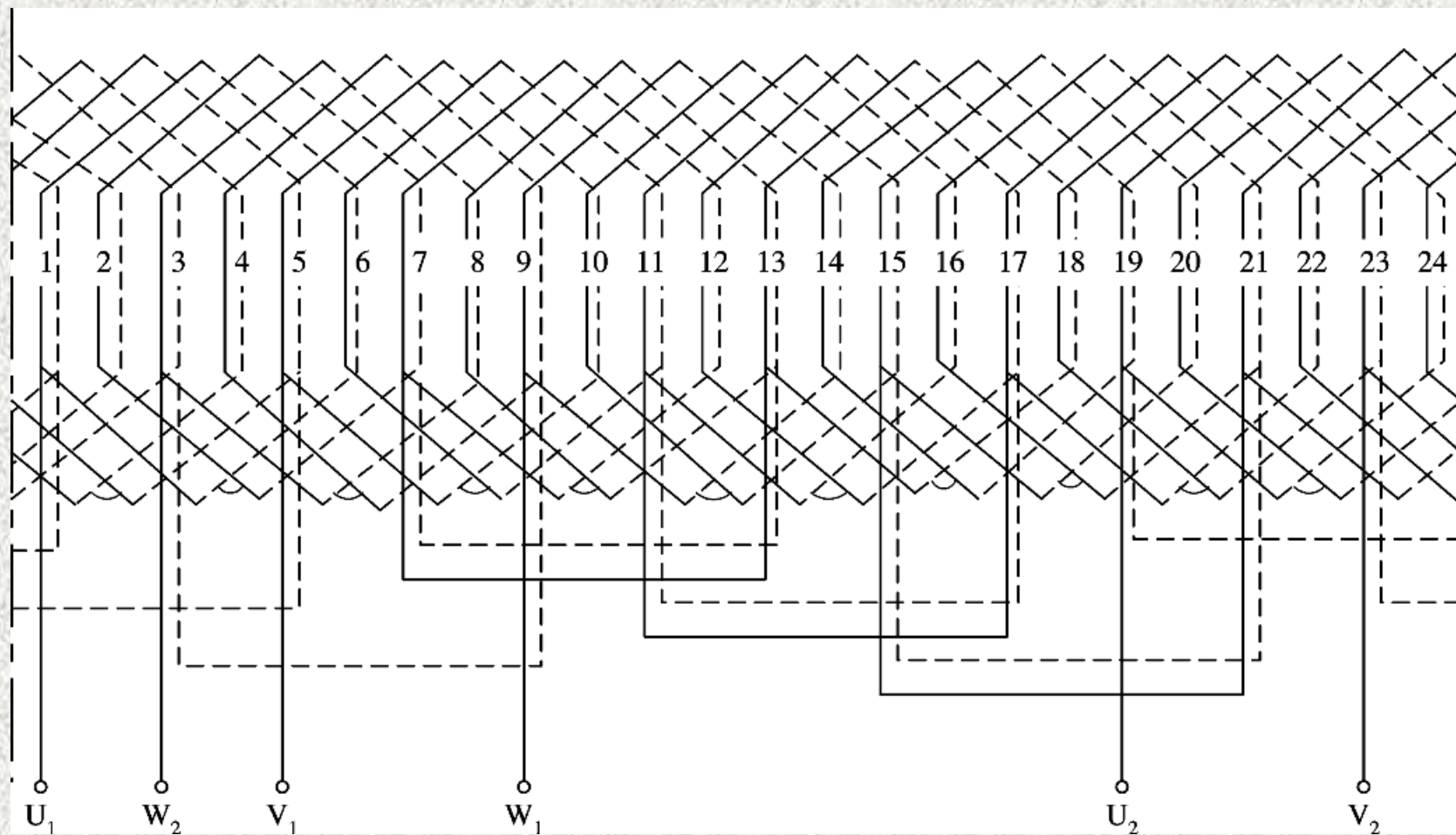
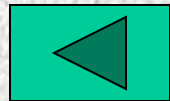


图4.1.10 三相双层短距叠绕组展开图



4.2 绕组的磁动势

4.2.1 单相绕组的磁动势——脉振磁动势 ψ

1. 整距线圈的磁动势 ψ

图4.2.1 (a) 所示为一台两极感应电动机的示意图，定子上有一个整距线圈 U_1U_2 ，线圈中通以电流 I ，在图示瞬间，电流由 U_2 流入，从 U_1 流出，电流 I 所建立的磁场的磁力线分布如图中虚线所示，为一两极磁场。

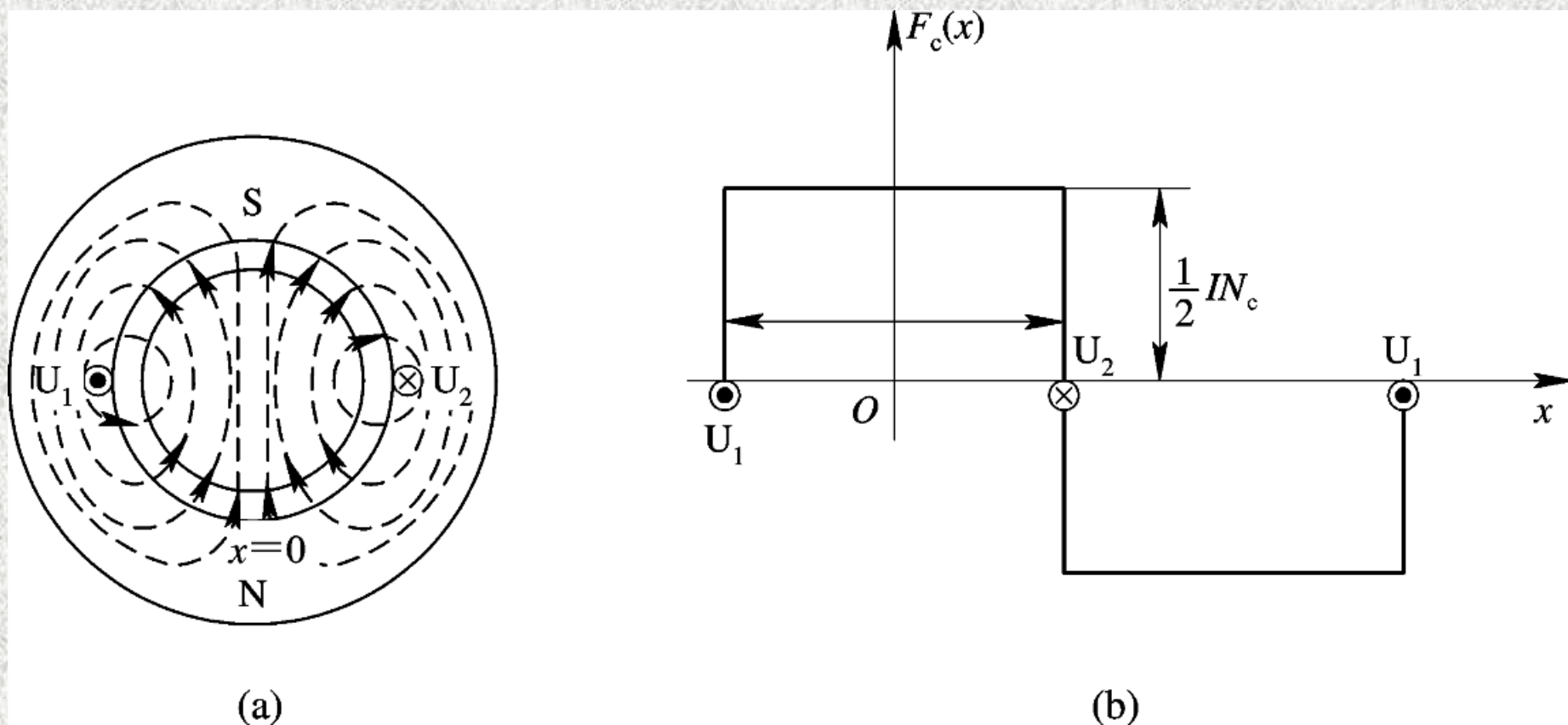


图4.2.1 整距线圈的磁动势 \mathcal{F}

(a) 整距线圈的磁场分布； (b) 整距线圈的磁动势分布曲线

根据全电流定律，每根磁力线所包围的全电流均为

$$\oint H \cdot dl = \sum I = IN_c \quad (4.2.1)$$

式中： N_c 为线圈匝数，也就是线圈每一有效边的导体数。 

为了分析绕组磁动势，将图4.2.1(a)展开为图4.2.1(b)，取 U_1U_2 线圈的轴线位置作为坐标原点。若略去铁心磁阻，则线圈磁动势完全消耗在两个气隙中。通常用一个气隙所消耗的磁动势来描述线圈(或绕组)磁动势，显然整距线圈所产生的磁动势在空间的分布曲线为一矩形波，如图4.2.1(b)所示，其幅值为 $IN_c/2$ ，周期为 2τ 。

若线圈中的电流为交流电流， $i = \sqrt{2}I_c \cos \omega t$ ，则磁动势矩形波幅度的一般表达式为

$$f(x, t) = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c \cos \omega t \quad (4.2.2)$$

磁动势矩形波随时间的变化而作正弦变化。当电流为最大值时，矩形波的高度也为最大值 $F_{ym} = \frac{\sqrt{2}}{2} N_c I_c$ 。当电流改变方向时，磁动势也随之改变方向，如图4.2.2所示。

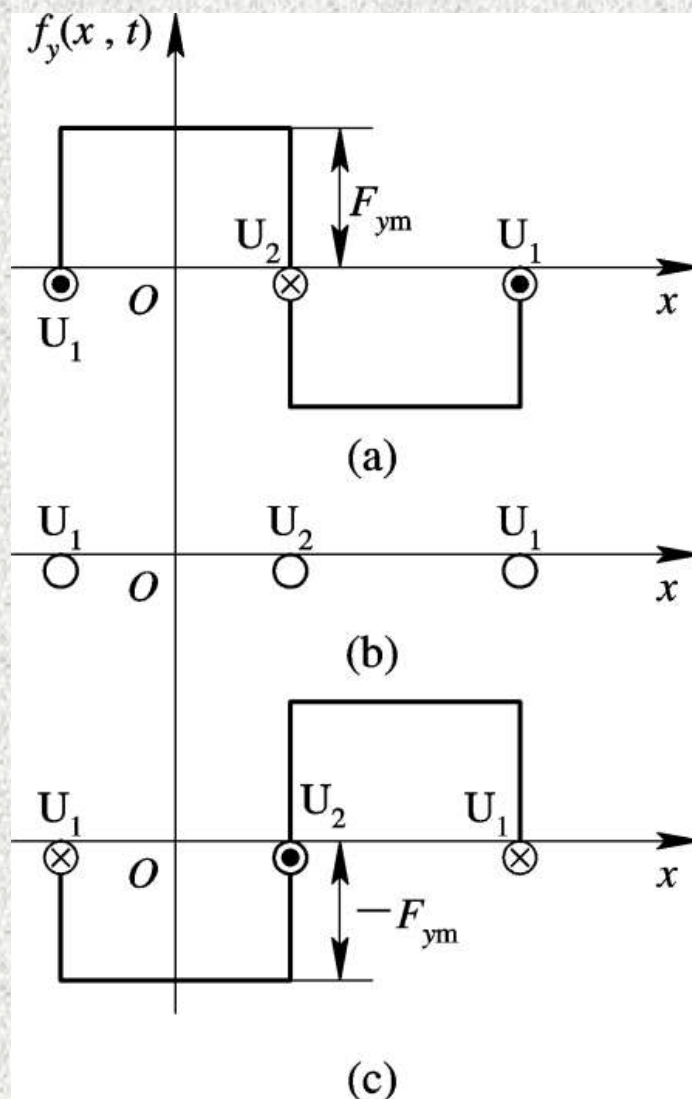


图4.2.2 不同瞬间的脉振磁动势

a) $wt=0^\circ$, $i=I_m$ b) $wt=90^\circ$, $i=I_m$ c) $wt=180^\circ$, $i=I_m$

由图4.2.2可知，整距线圈所产生的磁动势在任何瞬间，空间的分布总是一个矩形波，而矩形波的高度（即幅度）则随着电流的变化而变化。这种位置在空间固定而幅值随着时间的变化在正、负最大值之间变化的磁动势称为脉振磁动势，幅值为 $I_{ym} = \sqrt{2}N_c I_c / 2$ ，脉振的频率也就是线圈电流的频率。

将一个空间按矩形规律分布的磁动势用傅氏级数进行分解，可得到如图4.2.3所示的一系列谐波。因为磁动势的分布既横轴对称又纵轴对称，所以谐波中无偶次项，也无正弦项，这样按傅氏级数展开的磁动势可写为

$$F_{y(x)} = F_{y1} \cos \frac{\pi}{\tau} x - F_{y3} \cos \frac{3\pi}{\tau} x + \dots + F_{y\nu} \cos \frac{\nu\pi}{\tau} x \sin \frac{\nu\pi}{2}$$

式中： $\nu=1, 3, 5, \dots$ 表示谐波次数； $\sin \frac{\nu\pi}{2}$ 表示该项前的符号。

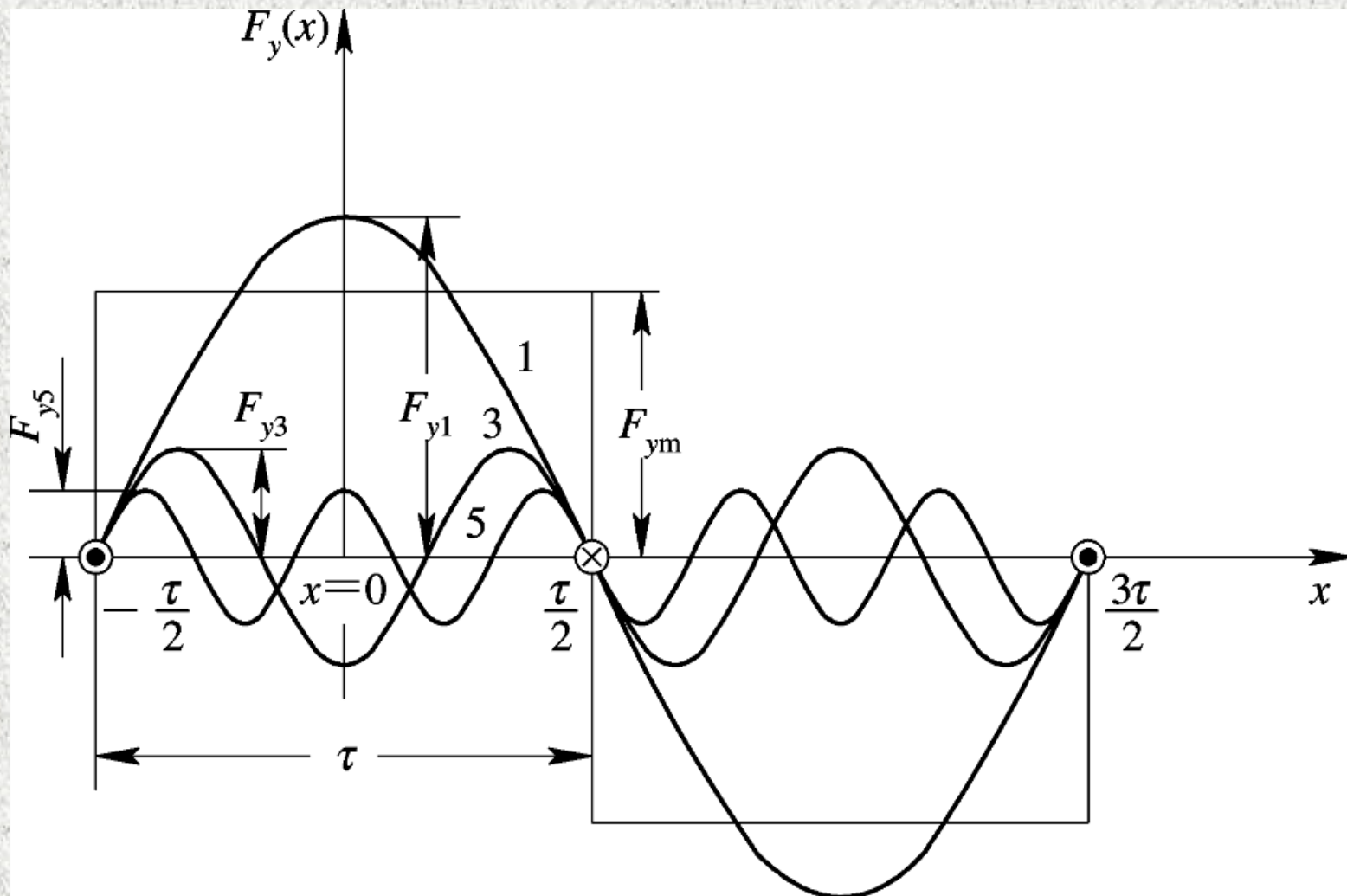


图4.2.3 矩形波磁动势的分解

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/838030054057007006>