

电 机 学

下 册

吴 大 榕 著

水 利 电 力 出 版 社

电机学

下册

第六版

中国电力出版社

电 机 学

下 册

吳 大 榕 著

水 利 电 力 出 版 社

內 容 提 要

本书大体上是按照前高等教育部頒布的电机学教学大纲编写的。全书分上下两册，共有五篇。編排次序系按直流电机—变压器—感应电机—同步电机—交流换向器式电机系統。在滿足基本要求的前提下，篇幅酌加压缩，适合两学期教学之用。

下册包括感应电机、同步电机和交流换向器式电机三篇，共十六章。最先敘述三相繞組和旋轉磁場，故在講授該章后，如須先授同步电机，也不致影响整个系統性。对于感应电动机的运行、特性、圖图，同步发电机的构造型式、运行特性、电枢反应、励磁問題等都作了較詳細的研討；最后說明各种主要交流换向器式电动机的原理和特性。

本书可作高等工业院校有关专业的教材或参考书；如經节略，也可作为中等技术学校有关专业的教学用书。

电 机 学 下 册

吳 大 榕 著

*

2213D626

水利电力出版社出版（北京西郊科學館二里內）

北京市书刊出版业营业許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店經售

*

850×1168 $\frac{1}{32}$ 开本*8 $\frac{1}{2}$ 印張*236千字*定价(第10类)1.60元

1959年11月北京第1版

1959年12月北京第2次印刷(9,191—13,410册)

目 录

第三篇 感应电机

第十七章 三相繞組及旋轉磁場

1. 交流繞組概說(285)
2. 电势星形图(287)
3. 三相单层繞組(288)
4. 綫圈中的感应电势(291)
5. 分布系数(292)
6. 三相双层繞組(294)
7. 短距系数(296)
8. 电势中諧波的消除和减小(298)
9. 单相脉动磁場(299)
10. 三相旋轉磁場(302)
11. 諧波磁場(304)
12. 由不平衡三相电流所生的旋轉磁場(306)
13. 三相合成磁势的波形(309)
14. 諧波漏磁通(311)

第十八章 感应电动机的构造和基本作用原理

1. 概論(311)
2. 感应电动机的构造(313)
3. 鼠籠式繞組的参数(318)
4. 基本作用原理(321)
5. 功率关系(323)

第十九章 感应电动机的运行

1. 轉子不动时的感应电动机(324)
2. 感应調整器(325)
3. 轉子轉动时的情况(326)
4. 等值綫路和矢量图(328)
5. 轉矩(331)
6. 简化等值綫路(336)
7. 由諧波磁場所生的附加轉矩(337)

第二十章 感应电动机的工作特性和圓图

1. 感应电动机的工作特性(341)
2. 感应电动机的圓图(342)
3. 空載試驗和短路試驗(343)
4. 圓图的作法和各种数量的导出(344)
5. 轉差率綫(347)
6. 各种不同的运行情况(348)
7. 参数变化对圓图的影响(349)
8. 柯矢琴柯的較准确圓图(351)

第二十一章 感应电动机的起动和速率調节

1. 感应电动机的起动問題(352)
2. 鼠籠式电动机在額定电压下直接起动(353)
3. 鼠籠式电动机的降压起动(354)
4. 繞綫式电动机应用起变动阻器(359)
5. 速率調节的方法(360)
6. 改变供电电源的频率来調节轉速(361)
7. 改变电动机的极数来調节轉速(361)
8. 改变轉差率来調节轉速(363)
9. 感应电动机的串級联接法(366)
10. 深槽式电动机(368)
11. 双鼠籠式电动机(371)

第二十二章 感应电动机的特殊情况和我国制造的感应电动机

1. 感应发电机(373)
2. 感应电动机在不平衡电压下运行(377)
3. 单相感应电动机(379)
4. 自整角电动机(385)
5. 弧形定子(386)
6. 我国制造的感应电动机(387)

第四篇 同步电机

第二十三章 同步电机的型式和构造

1. 概說(390)
2. 苏联和我国制造同步发电机的发展概况(391)
3. 同步电机的基本构造型式(392)
4. 汽轮发电机的构造(394)
5. 汽轮发电机的冷却和通风(397)
6. 水轮发电机的构造型式(400)
7. 分数槽繞組(402)
8. 分数槽繞組的繞組系数(406)

第二十四章 同步电机的基本作用原理和电樞反应

1. 两种旋轉磁場(407)
2. 同步电抗(408)
3. 磁通波間的相对位置(410)
4. 电樞反应的去磁作用和交磁作用(412)
5. 电樞磁势波的空間組成部分的分解(415)
6. 从电樞磁势求定子磁場(416)
7. 凸极式同步电机的順軸电樞反应(419)
8. 凸极式同步电机的交軸电樞反应(421)

第二十五章 同步发电机的特性

1. 直軸同步电抗和交軸同步电抗(424)
2. 同步发电机的矢量图(426)
3. 同步电抗的測定(429)
4. 短路比(432)
5. 电压調整率(433)
6. 漏抗和电樞反应的分开(436)
7. 同步电机的損耗和效率(437)

第二十六章 同步电机在大容量电网上的运行; 同步电动机

1. 隱极式同步电机的功角特性(438)
2. 凸极式同步电机的功角特性(443)
3. 静态稳定和动态稳定的概念(446)
4. 当电磁功率保持不变而激磁变化时隱极式同步电机的电流軌迹(449)
5. 同步电动机的矢量图(452)
6. 同步电机的各种运行情况(456)
7. 同步补偿机(457)
8. U形曲綫(458)
9. 同步电动机的起动(459)
10. 同步发电机的整步(461)
11. 轉移負載的方法(466)

第二十七章 同步发电机的短路

1. 不对称短路概說(467)
2. 逆序电抗(468)
3. 零序电抗(470)
4. 单相接地短路(471)
5. 二相短路(472)
6. 单相同步电机的电樞反应(476)
7. 突然短路概說(477)
8. 暂态电抗和次暂态电抗(479)
9. 当 $\psi_0 = 0$

时的突然短路电流(483) 10. 当 $\psi_0 = \psi_{H0}$ 时的突然短路电流(485)

11. 时间常数(487)

第二十八章 同步电机的振荡

1. 振荡的机械模型(490) 2. 振荡的基本方程式(492) 3. 微振荡(494)

4. 同步电机的自由振荡(496) 5. 同步电机在单独运行时的强制振荡(498)

6. 同步电机接在电网上的强制振荡(499)

第二十九章 旋转换流机

1. 从交流到直流的变换(502) 2. 同步换流机概述(503) 3. 电压比和电

流比(505) 4. 绕组元件中的电流波(507) 5. 电枢绕组中的铜耗(509)

6. 电枢反应和换向(511) 7. 电压调节和起动(513) 8. 双电流发电

机(514)

第五篇 交流换向器式电机

第三十章 交流换向器式电动机总论

1. 交流换向器式电动机的应用范围(515) 2. 直流电枢在脉动磁场

中(517) 3. 直流电枢在旋转磁场中(520) 4. 交流的换向(525)

第三十一章 感应电动机和换向器式电机的串联联接

1. 在感应电动机的转子回路中引入附加电势, 转速的调节(528) 2. 改

善功率因数的原理(530) 3. 用变频器引入附加电势(532) 4. 自激进

相机(534) 5. A-0-II串联系统(537) 6. 电路串联和机械串联的功率

分配图(539)

第三十二章 几种主要型式的换向器式电动机

(一) 三相并激反馈电动机

1. 基本构造元件和作用原理(540) 2. 调速范围(543) 3. 功率因数的

改善(545) 4. 矢量图和工作特性(546)

(二) 三相串激电动机

5. 基本作用原理(548) 6. 矢量图和工作特性(550)

(三) 单相串激电动机

7. 单相串激电动机的构造特点和接线图(552) 8. 矢量图和工作特

性(554) 9. 改善换向的方法(557) 10. 万能电动机(559)

(四) 推斥电动机

11. 基本作用原理(559) 12. 矢量图、等值线路和工作特性(562)

第三篇 感应电机

第十七章 三相繞組及旋轉磁場

17-1. 交流繞組概說

任何直流繞組，只要不用換向器和電刷，而在適當的地方引出分接，便可用做多相交流繞組。圖17-1表示一兩極機，有一環形繞組。電樞繞組不接到換向器和電刷，却在沿着電樞圓周等距離的地点引出三個分接1、2、3，再由分接通至外綫。那麼這一繞組便成為三相交流繞組，且有網形聯接法。注意應用分接與應用電刷的不同之點在於：電刷是在空間固定不動的，分接却隨着電樞繞組一同轉動。所以在把該繞組用作交流繞組時，每相感應電勢的波形，將依磁通波的空間分布情況而定。空間磁通波的分布，通常很接近於正弦波形。這三個分接既把整個電樞繞組分成三部分，且使任何兩部分的磁軸在磁場中相距120電度，各相感應電勢間便也有 120° 的相角差，我們便得一平衡三相繞組，接成三角形。同樣，如果我們引出六個分接，各分接間相距60電度，便得一平衡六相繞組。圖17-1只表示一兩極機，設如這一電機有較多的極數，則對其它各極對而言，應把該圖重復，重復的次數便等於極對數。

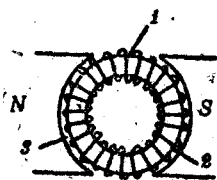


圖 17-1 簡單的直流繞組用作交流繞組

直流繞組都系閉合繞組，即從繞組上任一點出發，順着繞向前進，可以回到原來的出發點，自成一閉合回路。至於交流繞組，雖說閉合繞組也可應用，但在通常情況下都用開啟繞組。各相繞組都有始端和終端引至外面，且可隨意接成星形或網形。交

流繞組較直流繞組為簡單，因為各個元件都不需接至換向片。一般說來，交流繞組不需分為並聯支路，只需把屬於每一相的各個導體串聯連接即可。當電壓較高而電流較小時，可用每圈幾匝的圓形繞組。當電流較大時，可用條形繞組。條形繞組即系每圈一匝的繞組。把屬於同一相的各導體串聯時，連接的次序是無關重要的。對於圓形繞組而言，各繞圈可以有相同的大小，也可有幾種不同的大小。在把條形繞組連接時，可以用波繞法，也可用迭繞法，而以用波繞法連接較為簡單。交流繞組可以是單層繞組，也可以是雙層繞組。同步電機及感應電機的定子一般都用雙層繞組。單層繞組應用較少，僅用於小型感應電機的定子以及繞線式感應電機的轉子。

三相繞組即系三個分開的分布繞組，每兩繞組的磁軸之間在空間相距 120° 電度。三相繞組可以接成 Y，或接成 Δ ，或者接到一雙投開關，隨意調換成 Y 連接或 Δ 連接。在每一極距下的導體分為三等分，位於第一個 60° 以內的導體屬於 a 相，位於第二個 60° 以內的導體屬於 c 相，位於第三個 60° 以內的導體屬於 b 相。每相導體在極面下分布的距離，稱為相帶。我們取相帶等於 60° 。圖 17-2 表示三相繞組的分布情形。a 相繞組從 a 出發，從 a' 回來；b 相繞組從 b 出發，從 b' 回來；c 相繞組從 c 出發，從 c' 回來。由圖可見，a 軸與 b 軸之間，b 軸與 c 軸之間，以及 c 軸與 a 軸之間，各相距 $2/3$ 極距或 120° 電度。

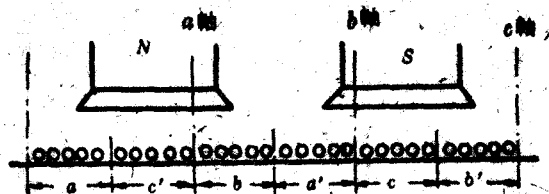


圖 17-2 三相繞組的分布情形

17-2. 电势星形图

設在每一相帶內有 q 槽，即令 q 为每极每相槽数。又設 m 为相数， α 为槽距，則有

$$\alpha = \frac{180}{mq} \text{ 电度}; \quad (17-1)$$

当 $m=3$ 时，
$$\alpha = \frac{60}{q} \text{ 电度}. \quad (17-2)$$

α 即为位于相邻两槽內的导体的感应电势間的相位差。当以上各种数值为已知时，便可据以作出电势星形图。

試举一例以說明之：設有一 3 相 4 极机，共有 24 槽，每极每相槽数 $q=2$ ，槽距 $\alpha=30^\circ$ 。由于相帶占 60° ，每一相帶內有 2 槽。编号为 1、2、7、8、13、14、19、20 的各槽属于 a 相，编号为 5、6、11、12、17、18、23、24 的各槽属于 b 相，编号为 9、10、15、16、21、22、3、4 的各槽属于 c 相。电势星形图如图 17-3 所示，(a) 表示槽电势，(b) 表示綫圈电势，(c) 表示相电势。各相电势組成一平衡三相系統。

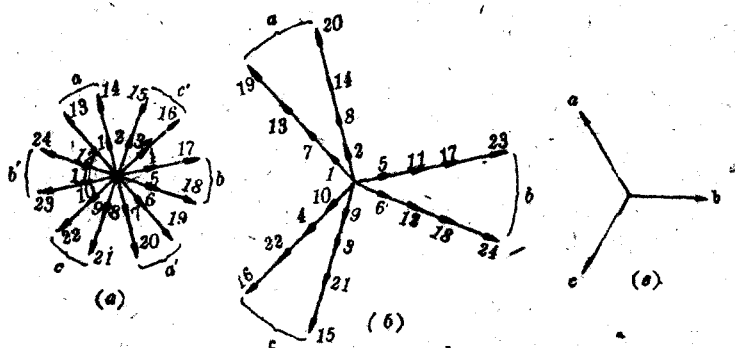


图 17-3 电势星形图

(a) 槽电势；(b) 綫圈电势；(c) 相电势。

17-3. 三相单层绕组

三相单层绕组有各种不同的绕法，仍取上例的数据，即令槽数 $Z=24$ ，极数 $2p=4$ ，每极每相槽数 $q=2$ 。在图17-4中，实线表示 a 相，虚线表示 b 相，点线表示 c 相。每相各有两个线圈，一大一小。 A 、 B 、 C 为各相绕组的始端， X 、 Y 、 Z 为各相绕组的终端。如用 Y 联接法，可把 X 、 Y 、 Z 联成中点。绕组的接端部分向后弯曲在两个平面内，排列形式可取图17-7的任一种。这种绕组称为两平面绕组。电势星形图如图17-3所示。

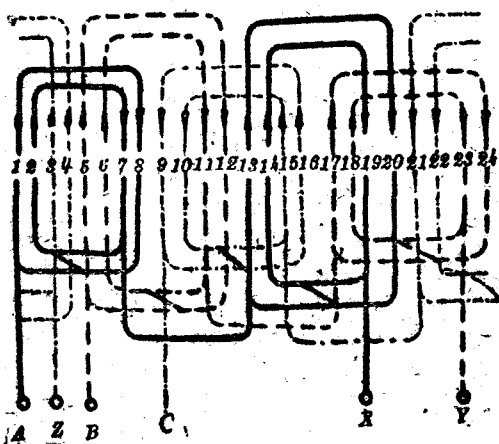


图 17-4 三相两平面单层绕组

$$p=2; q=2.$$

图17-5所示的情形为另一种绕法。此时两个相邻同相导体的端接部分向着左右两边分开。每相绕组各有4个线圈。绕组的端接部分向后弯曲在三个平面内，排列形式可取图17-8的任一种。这种绕组称为三平面绕组。和前一种绕法比较时，这种绕组的端接部分较短，故用铜量较省，但其缺点为修理时较不方便。

为要使定子能分为两半，可用如图17-6所示的接线图。由图可见，定子可沿 JK 线及 LM 线分开。这种绕组的端接部分分别

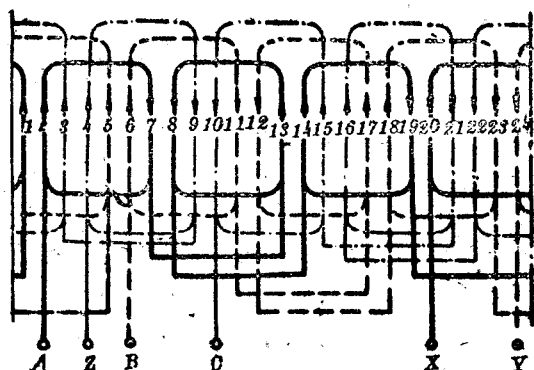


图 17-5 三相三平面单层绕组，定子不可分开

$p=2; q=2.$

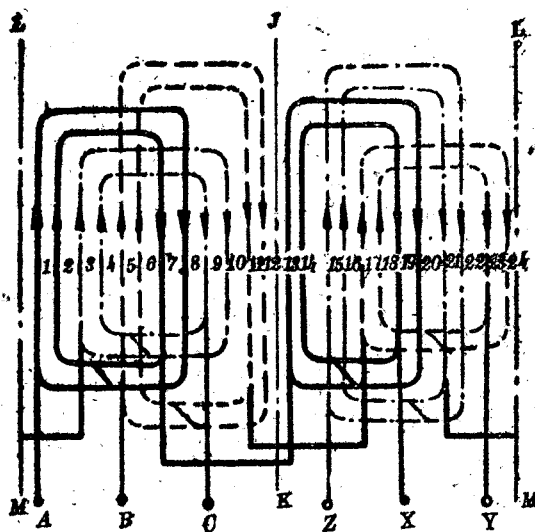


图 17-6 三相单层三平面绕组，定子可以分开

$p=2; q=2.$

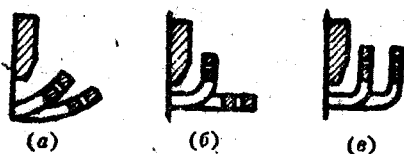


图 17-7 两平面绕组的端接排列形式

弯曲在三个平面内，故亦为三平面绕组。绕组所用线圈共有三种不同的大小，A相有两个中线圈，B相和C相各有一个大线圈和一个小线圈。

如把每个线圈的端接部分弯曲在两个平面内，则整个绕组的所有线圈都可有相同的形状。此种绕组称为等元件圆形绕组。绕组接线图如图 17-9(a)所示，端接部分的排列形式可取图 17-9(b)所示的任何一种。为了清晰起见，接线图仅画一相。



图 17-8 三平面绕组的端接排列形式

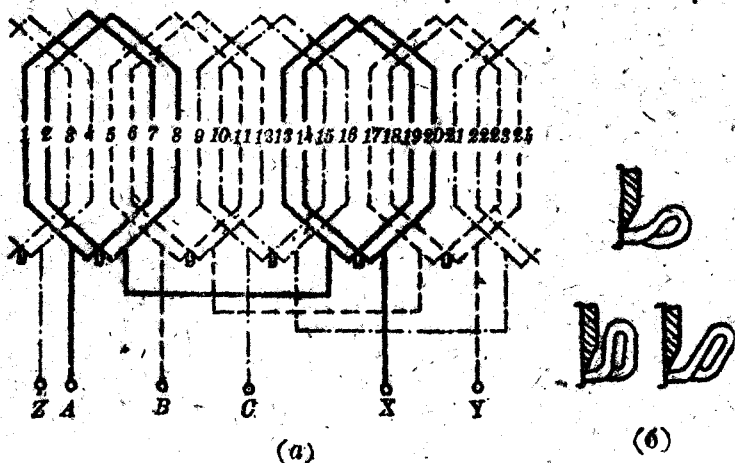


图 17-9 三相单层等元件圆形绕组
(a)接线图；(b)端接排列形式。

17-4. 綫圈中的感应电势

参看图 17-10，設在定子圓周上有一单匝整距綫圈，在轉子上有 p 对磁极，以每秒 n 轉的速率截切定子綫圈。当 $t=0$ 时，在定子綫圈中所鏈連的轉子磁通为最大。又設轉子磁通密度沿着空气隙按正弦律分布，定子綫圈中的感应电势便也按正弦律对時間变化。每当轉子轉过一对磁极时，定子綫圈中的感应电势便也經過一个周期。因此，綫圈中的感应电势的頻率(每秒周期数)即等于在每秒钟內轉过的轉子极对数。如用公式表示，即为

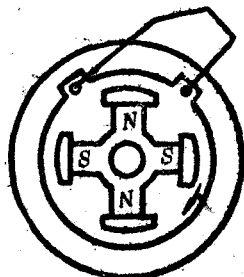


图 17-10 轉子磁通截切定子綫圈

$$f = pn, \quad (17-3)$$

式中 p ——轉子磁极对数。

当 $t=t_1$ 时，轉子轉过的距离为 $2\pi nt_1$ 机械弧度或 $2\pi pnt_1 = 2\pi ft_1 = \omega t_1$ 电弧度，其中

$$\omega = 2\pi f, \quad (17-4)$$

即为以每秒电弧度計的轉子角速率。故在任一瞬間定子綫圈中所鏈連的磁通为

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t, \quad (17-5)$$

綫圈中的感应电势便为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t. \quad (17-6)$$

于是得一直綫圈的感应电势的有效值为

$$E_{em} = \frac{\omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f \Phi_m. \quad (17-7)$$

設如該綫圈为一具有 w 匝的集中綫圈，式(17-7)便可写作

$$E = 4.44 f w \Phi_m. \quad (17-8)$$

式(17-8)与变压器的感应电势公式(12-4)相同。每一导体中的感

应电势为每匝感应电势之半，即

$$E_{np} = 2.22 f \Phi_m. \quad (17-9)$$

式中 Φ_m ——每极磁通。

假如磁通密度波的空间分布不能完全符合于正弦规律时， Φ_m 便为每极基波磁通。磁通波中的空间谐波将在线圈中感应时谐波电势。例如，磁通波中三次空间谐波和基波相比较时有三倍多的极数，按式(17-3)，感应电势的频率亦为基波频率的三倍。对于三次谐波而言，式(17-8)便如下式：

$$E_3 = 4.44(3f)w\Phi_3, \quad (17-10)$$

式中 Φ_3 ——每极三次谐波磁通。其它各次谐波均仿此。

17-5. 分布系数

实用的电机绕组都系分布绕组。相邻各匝导体中的感应电势并不同相，而将依次移过一相角，等于槽距 α 。因此，如有 w 匝导体串联，总的电势将不等于每匝电势的 w 倍，而将等于各匝电势的矢量和。也就是说，合成电势将较各匝电势直接相加时为大。或者，用另一种看法，绕组的分布好像是减少了它的有效匝数。分布绕组的感应电势，便等于相应的集中绕组的感应电势，乘上一系数。这一系数称为分布系数，它的数值依绕组的分布情况而定，它永远较一为小。

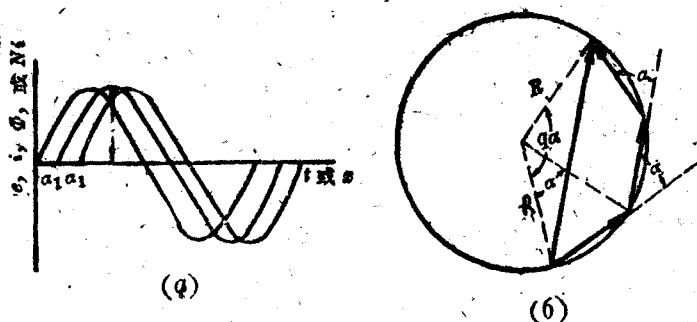


图 17-11 分布系数的推导

每匝感应电势的时间波如图17-11(a)所示。各匝感应电势波的振幅和周期都相等，它們相互之間的相角差为 α 。把这些正弦波相加时，可用图17-11(6)所示的矢量图。由于各矢量的长短都相等，且每相邻两矢量均各依次移过一相角 α ，如把 q 个矢量相加，必将构成正多边形的一部分。我們將为这一正多边形作一外接圆，并以 R 为外接圆的半径。从几何关系，可得

$$E_{sm} = 2R \sin \frac{\alpha}{2},$$

$$E = 2R \sin \frac{q\alpha}{2},$$

$$\text{即有} \quad E = E_{sm} \frac{\frac{\sin q\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (17-11)$$

当每匝电势均为同相时，合成电势便为每匝电势的 q 倍，故得分布系数为

$$k_p = \frac{E}{q E_{sm}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (17-12)$$

如对基波而言，相邻两导体間的相位差为 α ，則对 ν 次空間諧波而言，它們之間的相位差便为 $\nu\alpha$ ，故得 ν 次諧波的分布系数为

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{q\nu\alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu\alpha}{2}} \quad (17-13)$$

由于 $k_{p\nu}$ 常較 k_p 为小，繞組的分布将使合成感应电势的时间波，比較磁通密度的空間波，更为接近于正弦波形。

在图17-11中，如横坐标改用空間角 α ，纵坐标改用磁势 F ，亦可得同样的結果。故分布系数不仅可以适用于各匝感应电势的相加，也可适用于各匝所生磁势的相加。

例 設有一均匀分布的三相繞組，試求当相帶为60电度时和相帶为120电度时的分布系数。

解 当繞組为均匀分布时，即假设每相槽数或导体数为无穷多时〔見第2-3节〕。

(1) 設相帶为60电度， $q\alpha=60^\circ=\frac{\pi}{3}$ ，

$$k_p = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

当 $q \rightarrow \infty$ 时， $\alpha \rightarrow 0$ ， $\sin \frac{\alpha}{2} \rightarrow \frac{\alpha}{2}$ ，

故得
$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{\pi} = 0.955.$$

(2) 設相帶为120电度， $q\alpha=120^\circ=\frac{2\pi}{3}$ ，

故得
$$k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.827.$$

由此可見，三相繞組如用60电度的相帶时，有效匝数較实有匝数减少不多，而如用120电度的相帶，則有效匝数將較实有匝数减少得太多，故三相繞組的相帶，一般都用60电度。

17-6. 三相双层繞組

双层繞組应用很广，和直流繞組一样，每一槽中的上层导体必須和另一槽中的下层导体相联。如綫圈的跨距相等，則为整距繞組，如綫圈的跨距較极距为小，則为短距繞組。图17-12所示的三相双层繞組，共有4极24槽，每极每相2槽，(a)为整距繞組，綫圈跨距为6槽，(b)为短距繞組，綫圈跨距为5槽或 $5/6\tau$ 。为了清晰起见，图中只画一相。每相共有4个綫圈組。当有整距繞組时：第一綫圈組为1-7'-2-8'，右繞；第二綫圈組为14'-8-13'-7，左繞；第三綫圈組13-19'-14-20'，右繞；第四綫圈組为2'-20-1'-19，左繞。当有 $y=5/6\tau$ 的短距繞組时：第