

高等学校試用教科书

电 机 学

下 册

浙 江 大 学 編



中 国 工 业 出 版 社

本书为电机学下册，由第三篇开始，共分四篇。主要内容是：交流电机理论的一般问题；异步电机；同步电机；交流换向器电机。

本书可作为高等学校电机与电器专业试用教科书，也可供电机与电器方面科学研究人员和工程技术人员参考。

电机学

下 册

浙 江 大 学 编

*

第一机械工业部教材编审委员会编辑（北京复兴门外三里河第一机械工业部）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $21^{3/4}$ ·字数523,000

1962年6月北京第一版·1962年6月北京第一次印刷

印数0001—7,290·定价(10—5)2.55元

*

统一书号：K 15165·1336(一机-242)

目 录

第三篇 交流电机理論的

一般問題

导言	1
第十八章 交流电机的繞組和电势 ..	2
I 交流整数槽繞組	2
18-1 概述	2
18-2 三相双层整数槽迭繞組	4
18-3 三相双层整数槽波繞組	6
18-4 三相单层繞組	8
18-5 单相交流繞組	10
II 交流整数槽繞組的电势	11
18-6 在正弦分布磁场下的繞組电势	11
18-7 在非正弦分布磁场下的繞組电势	16
18-8 繞組的星形和三角形連接	18
18-9 减少繞組电势中高次谐波的方法	19
III 交流分数槽繞組及其电势	20
18-10 概述	20
18-11 三相分数槽繞組的联接方式	21
18-12 分数槽繞組的分布系数及每相电势	26
18-13 齿谐波电势	27
18-14 分数槽繞組的用途和作用	30
IV 电机繞組的絕緣	31
18-15 电机繞組的絕緣	31
第十九章 交流繞組的磁势和漏抗 ..	37
19-1 概述	37
19-2 单相繞組的磁势, 脉振磁势	38
19-3 三相繞組的磁势, 旋轉磁势	43
19-4 三相分数槽繞組的磁势	49
19-5 交流电机中的漏磁场和漏抗	49
19-6 漏抗計算	50
第二十章 交流电机的冷却方式	59
20-1 概述	59
20-2 交流电机的空气冷却方式	60
20-3 氢气冷却方式	63
20-4 液体冷却方式	66

20-5 电机冷却方式

第四篇 异步电机

第二十一章 异步电机的基本結構和原理	71
21-1 概述	71
21-2 异步电动机的分类	72
21-3 异步电动机的主要結構	74
21-4 轉子静止时异步电机的运行	79
21-5 轉子旋轉时异步电机的运行原理	84
21-6 鼠籠式异步电动机的运行	91
第二十二章 异步电机的电磁轉矩和机械特性	97
22-1 概述	97
22-2 异步电动机运行时的能量轉換过程	97
22-3 异步电动机的电磁轉矩公式	100
22-4 异步电动机的轉矩与轉差率的关系 (机械特性)	103
22-5 异步电动机的附加轉矩	106
第二十三章 异步电机的圓图	110
23-1 概述	110
23-2 简化的电流圓图	111
23-3 从简化的电流圓图求取异步电机的运行数据和特性曲线	113
23-4 較准确的电流圓图	117
23-5 异步电机参数变化时电流向量的軌跡	118
第二十四章 槽步电动机的起动	121
24-1 概述	121
24-2 起动过程	121
24-3 鼠籠式电动机的起动	125
24-4 繞繞式电动机的起动	127
第二十五章 深槽电动机和双鼠籠电动机	131
25-1 深槽式电动机	131
25-2 双鼠籠电动机	133

第二十六章 三相异步电动机的调速	135
26-1 概述	135
26-2 改变极对数调节电动机的转速	135
26-3 改变电源频率调节电动机转速	138
26-4 改变转子电阻调节电动机的转速	139
26-5 异步电动机串级联接调速	140
第二十七章 三相异步电机在发电机和制动器情况下运行	143
27-1 异步电机在发电机情况下运行	143
27-2 自激异步发电机	145
27-3 异步电机的电制动	147
第二十八章 单相异步电动机	149
28-1 三相异步电动机在三相不平衡电压下的运行	149
28-2 单相异步电动机的运行原理	151
28-3 单相异步电动机的等值电路	152
28-4 单相异步电动机的起动机法及主要型式	154
28-5 单相异步电动机的应用	156
第二十九章 异步电动机的特殊运行状态和特殊类型	157
29-1 概述	157
29-2 异步电动机在非额定电压下的运行	158
29-3 异步电动机在频率不等于额定频率时的运行情况	153
29-4 异步电机运行于同步耦合系统——自整角机	159
29-5 空心转子异步电机	162
29-6 迴轉變压器	163
第五篇 同步电机	
第三十章 同步电机概論	165
30-1 同步电机构造的基本形式及其应用范围	165
30-2 汽轮发电机的结构	166

30-3 水轮发电机的结构	171
30-4 同步电动机的应用及结构概述	175
第三十一章 同步电机的电枢反应	178
31-1 概述	178
31-2 三相同步发电机在对称负载下的电枢反应	179
31-3 隐极同步机电枢反应的計算	182
31-4 凸极同步机电枢反应的計算——双反应理論	184
31-5 单相电机的电枢反应	188
第三十二章 同步发电机的正常运行	192
32-1 概述	192
32-2 平衡负载下的电势向量图 (DTC 图)	195
32-3 持續平衡负载下的同步电机参数的測定	196
32-4 相对单位制	202
32-5 电压变化 $\Delta U\%$ (亦称电压调整率) 的測定	203
32-6 同步发电机的特性曲綫	206
32-7 同步发电机的損耗与效率	209
第三十三章 同步电机的并联运行	214
33-1 概述	214
33-2 单相发电机的并联运行	214
33-3 三相发电机的并联运行条件	216
33-4 同步发电机的电磁功率、电磁轉矩和功角特性	219
33-5 同步发电机与强大电网并联运行时的稳定性	220
33-6 当改变同步发电机激磁时, 发电机与强大电网的并联运行情况	225
33-7 容量相近的少数同步发电机的并联运行	228
第三十四章 同步电动机	233
34-1 由发电机的运行方式过渡到电动机的运行方式	233
34-2 同步电动机正常运行的分析	234

34-3	反应式电动机	240
34-4	同步补偿机	242
第三十五章 三相同步发电机的不平衡持续短路运行 246		
35-1	概述	246
35-2	对于各序电流分量的同步机的阻抗	248
35-3	三相同步发电机的不平衡持续短路	252
35-4	不对称负载下运行时的电势向量图	259
第三十六章 同步电机的突然短路 263		
36-1	概述	263
36-2	同步电机定子绕组在 $\phi_0 = 0$ 时的突然对称短路	263
36-3	当 $\phi_0 = \phi_n$ 时的突然三相短路	269
36-4	突然三相、二相和单相短路时电流的有效值	272
36-5	突然短路的时间常数	273
36-6	短路电流的效应	275
第三十七章 同步电机的振荡 282		
37-1	同步机振荡的基本物理景象	282
37-2	同步机在振荡时的转矩方程式	284
37-3	电机在无穷大电网上运行时的自由振荡和强制振荡	287
37-4	单机运行时的强制振荡	291
第三十八章 单枢换流机 293		
38-1	概述	293
38-2	单枢换流机的结构和工作原理	294
38-3	单枢换流机的电压比和电流比	294
38-4	单枢换流机电枢绕组里的总电流及损耗	297
38-5	单枢换流机的电枢反应及电压调节	303

38-6	单枢换流机的换向特点	304
38-7	单枢换流机的起动	305
38-8	单枢换流机的特殊运行	306

第六篇 交流换向器电机

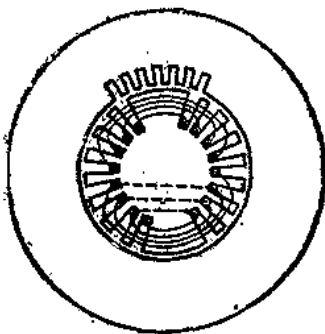
第三十九章 单相换向器电动机 308		
39-1	单相换向器电机内的感应电势	308
39-2	单相串激电动机的作用原理和运用特性	311
39-3	单相换向器电机电枢中的电流分布和换向	315
39-4	普通电动机	318
39-5	推斥电动机的作用原理	319
39-6	推斥电动机的运行性能	320
39-7	具有两套电刷及一个定子绕组的推斥电动机	323
第四十章 多相换向器电动机 324		
40-1	多相换向器电机的电刷电势	324
40-2	多相换向器电机电枢中的磁势和换向	326
40-3	在异步电机副边电路内加入附加电势	329
40-4	转子馈电的三相并激换向器电机	331
40-5	定子馈电的三相并激换向器电动机	335
40-6	三相串激换向器电动机	335
第四十一章 异步电机与换向器电机的串联联接 339		
41-1	概述	339
41-2	异步机、单枢换流机和直流电机的串联联接系统(A—O—II串联系统)	339
41-3	双边调速的A—O—II串联系统	340
41-4	相位补偿机	341
41-5	转子馈电补偿的异步电动机	343

第三篇 交流电机理論的一般問題

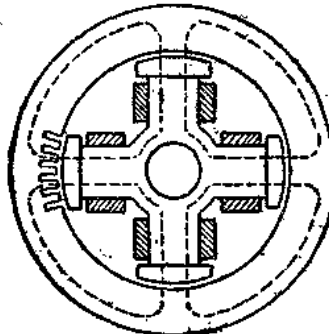
导 言

交流电机主要分成两大类，即同步电机和異步电机（也称感应电机）。就結構言，任何旋轉电机均可大致分为两部分：a) 固定部分，称为定子；b) 轉动部分，称为轉子。在电机里，装置着导体，产生电势并流通电流以进行机械能和电磁能轉变的部分通称电枢。在同步电机里，通常定子是电枢，而轉子繞組是由直流激磁的；在普通異步电机里，轉子相当于电枢，而定子繞組則由交流激磁。一般三相的交流电机，無論是同步机或異步机，定子上都装置有三相交流繞組，当通进交流电时，三相合成产生一个空間的旋轉磁势波，此磁势波的旋轉速度（决定于电流頻率与磁极对数）叫做同步速度。凡在正常运行情况下，轉子速度总是等于同步速度的交流电机称为同步电机，反之，凡轉子速度不等于同步速度的交流电机称为異步电机。

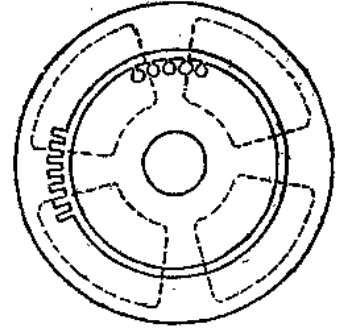
同步电机有两种主要构造型式：隱极式和凸极式。隱极式同步电机通用于汽輪机推动的高速发电机中，这里轉子上由于受到很大的机械应力，所以它是做成圓柱形的，直流激磁繞組以分布的形式安放在轉子槽內，并用金属槽楔加以固定。凸极式（亦称显极式）同步电机具有显露的磁极，直流激磁繞組是以集中形式繞在轉子的磁极鉄心上。同步电机的轉子繞組接到直流电源，轉子運轉在同步速度，故放置在定子槽內的定子繞組将因电磁感应作用而感生电势。異步电机的定子繞組接到交流电源，它从电源引进激磁电流以产生磁通；轉子繞組接成为閉合迴路，并不接連电源，它由定子繞組所产生的磁通經感应作用而获得电能。



图(三) — 1 2极隱极式同步电机示意图



图(三) — 2 4极凸极式同步电机示意图



图(三) — 3 4极異步电机示意图

图(三) — 1 为2极隱极式同步电机的示意图，轉子上画出激磁繞組，定子上画出相对于轉子大齿的一部分槽；图(三) — 2 为4极凸极式同步电机的示意图，定子上只画出一个磁极下面部分的槽，图中虛綫示电机的主磁通磁路。图(三) — 3 为4极異步电机的示意图，在定子和轉子上各画出一部分槽，定子与轉子間的气隙环繞整个电机都是均匀的。

同步电机和异步电机在构造和性能上有许多特点，但它们在能量转变的过程中具有一系列共同性的问题。例如，它们的定子绕组一般都是由导线对磁场的相对运动而产生三相交流电势；而当此绕组中通过交流电流时都产生三相合成的旋转磁势波和每相单独的漏磁。本篇就是要阐明交流电机中若干共同性的问题：交流绕组、绕组绝缘、电势、磁势、漏抗，以及交流电机的冷却方式，这些问题在以后交流电机运行性能的分析 and 讨论中有着特别重要的意义。

第十八章 交流电机的绕组和电势

I、交流整数槽绕组

18-1 概 述

当交流电机运转时，在其中感应出交流电势并流过交流电的绕组总称为交流绕组（在一般直流电机的电枢绕组元件里也感应出交流电势，但由于换向器的作用绕组电势却变换为电刷上的直流电压而引出）。本篇有关章节中所论述的交流绕组是限于交流电机的定子绕组，以及和定子绕组相类的如异步电机的绕转子绕组。其它如鼠笼绕组和阻尼绕组等特殊型式的交流绕组则将在以后相应的章节中加以论述。

电机绕组是任何电机的最重要部件之一，对于绕组一般都要求其导线具有良好的导电性能，而线圈绝缘却要有足够的绝缘强度，良好的耐热性能或散热能力和机械强度，并在能保证电机效率等性能的基础上争取得到最高的材料利用率。因此一般交流绕组的导电芯线都是采用铜线或铝线，而线圈的绝缘层一般采用云母纸、漆布、青壳纸、浸渍过的纱布或玻璃布、塑料等。

为了提高劳动生产率并减轻劳动强度，现代电机的绕组大都采用线模拉制出形状相同的绕组元件（小电机因导线细，可直接在绕线机上绕制），然后把它们一个个嵌入电机铁心的槽中，再按一定方式把它们连接成完整的绕组。绕组元件可能是单匝的或多匝的。当电机容量大时，由于额定电流值很大，如采用单根导线的元件，导线的截面积可能太大，因而很硬，不便绕制。此外由于集肤效应等缘故，也将引起电机较大的附加损耗，使电机效率降低，这时可以采用双股以至多股的导线并联绕成多股的单匝或多匝元件（图18-1）。

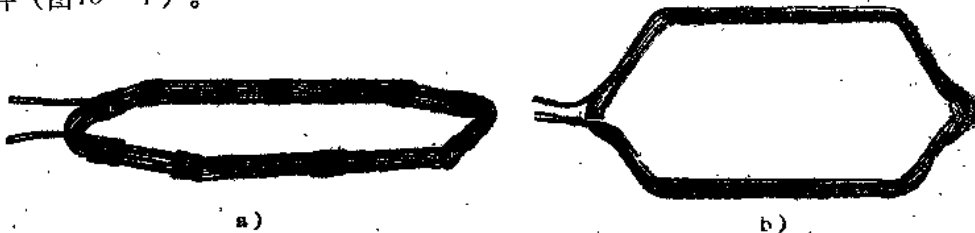


图 18-1 绕组元件

a—单股多匝元件；

b—双股多匝元件

下面我們介紹交流繞組的一些最基本的属性及繞組的主要分类。

1. 每极每相槽数 在設計多相繞組时，每极每相所占有的槽数是一个重要的数据，此数据普通用字母 q 来代表。如令总槽数为 Z ，磁极对数为 p ，相数为 m ，則得：

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (18-1)$$

交流繞組的每极每相槽数 q 可以为整数，也可以为分数，前者称为整数槽繞組，后者称为分数槽繞組。

2. 繞組的节距 与直流电机相同，繞組元件有两个元件边，分別嵌入不同槽中，每元件再按一定关系接至其它元件，因此与直流电机一样，我們可得以下三种节距。

两个元件边之間的距离称作繞組第一节距 y_1 （对于交流电机，此节距有时亦簡写为 y ，因为其它节距不常談），或簡称繞組节距。

从第一个元件的末边到与其連接的第二个元件的起边間的距离，称作繞組的第二节距 y_2 。

直接相連的两个元件的对应边之間的距离称作合成节距 y_p 。

同样地节距虽然代表一个距离，但通常它并不以厘米等长度单位来表达，因为

我們感兴趣的只是两元件边之間所跨的槽数，由它的数值來說明繞組如何布置的实质，所以节距平常均用槽距作为度量单位；例如 $y_1 = 9$ 。有时繞組节距也用极距 τ 的分数来表示，例如 $y_1 = \frac{7}{9} \tau$ ，这是当要說明繞組节距与极距間相比的关系时才用。在工程

习惯上也往往采用第一号元件的两元件边所放置的槽号来表示繞組节距，例如 $y_1 = 1-10$ ，这和 $y_1 = 9$ 实际上是一样的。

由于要得到最大的元件电势，通常总希望两元件边的电势成为同相的相加关系，亦即希望采用整距繞組（即 $y_1 = \tau$ ），但由于某些其它原因（例如为了得到接近于正弦的电势波形等），在交流电机中常采用短距繞組（即 $y_1 < \tau$ ）。

3. 迭繞和波繞 对于迭繞式和波繞式两种交流繞組，第一节距 y_1 总是接近于一个极距，使繞組元件能感应出較大的电势，至于合成节距 y_p 則在两种繞組是大不相同的。

在迭繞組里，每一元件的末边均返回至其起边邻近的次一个或两个元件边（一般也是相邻的次一个或两个槽），整个繞組形成环环相迭的形象，故称迭繞組。与直流机相同，迭繞組各节距之間的关系为：

$$y_1 \approx \frac{S}{2p}$$

$$y_p = y_1 - y_2 = \begin{cases} 1 \text{ (单迭)} \\ 2 \text{ (双迭)} \end{cases}$$

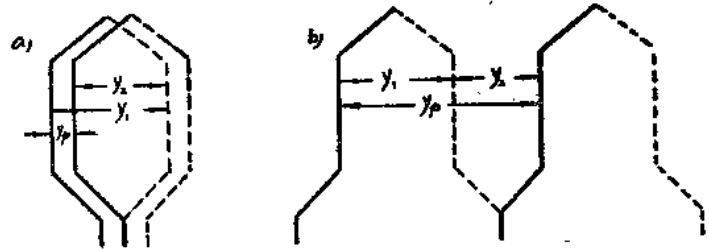


图 18-2 繞組的节距

a—迭繞組； b—波繞組

上式中 S 代表繞組的元件數。

波繞組則不同，每一元件的末邊，並不返回至其起邊附近，而是繼續前進至距其起邊約一對極距的另一元件的起邊，這樣整個繞組形成波浪連綿的形象，故稱波繞組。波繞組各節距的關係為：

$$y_1 \approx \frac{S}{2p}$$

$$y_r = y_1 + y_2 \approx \frac{S}{p}$$

y_r 值只是在 S/p 之值上下；對交流波繞組和直流波繞組而言， y_r 的數值與 S 、 p 的關係是不盡相同的。

在確定繞組的接線圖時，所選取的 q 、 y_1 和 y_r 值是最重要的必需數據。

4. 繞組的分類 最常用的交流繞組可以分類如下：以下的分類是按繞組的某一屬性或結構來分的，因此任一分類並不能單獨表征繞組的全部特點。

(a) 按照電機相數的多少，可分為單相繞組和多相繞組（普通是三相）。

(b) 按照每極每相槽數 q 為整數或分數，而可分作整數槽繞組或分數槽繞組。

(c) 按繞組節距 $y_1 = \tau$ 或 $< \tau$ 而可分作整距或短距繞組。

(d) 按繞組元件兩繞端布置的不同形式可分為迭繞組和波繞組。

(e) 按繞組在槽中布置的情況可分為單層繞組和雙層繞組。雙層繞組在現代交流電機中應用最廣。

(f) 按繞組元件制成方法的不同可分為繞圈式繞組和杆式（或稱棒條式）繞組。繞圈式繞組的元件繞成整只的繞圈，杆式繞組的元件則由半圓式的導杆彼此間用併頭套連接并焊接而成。

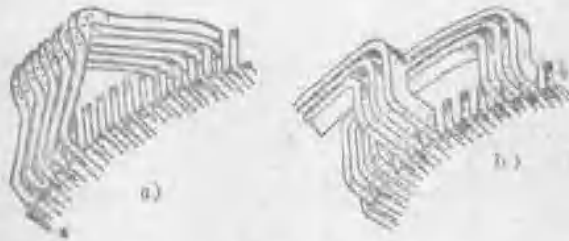


圖 18-3 單層和雙層繞組在槽中的布置
a—雙層的；b—單層的

此外，還可以按繞組的其它特點來分類，這將逐步地在本章中加以闡述。

18-2 三相雙層整數槽迭繞組

交流繞組系由許多繞圈所組成，每一繞圈只有兩個端點，故相當於一個元件。交流雙層繞組的主要優點為：(a) 全部繞圈都是相同的，因而它們的製造適合於生產過程機械化，可以大批生產；(b) 可能選擇最有利的繞組節距，即利用短距，使繞組端部縮短，銅線節省，且電勢波形得以改善（詳後）。

三相雙層迭繞組是一種最常用的交流繞組，圖 18-4，a 示整數槽的（ $q =$ 整數的）三相雙層迭繞組的連接方式。

A. 基本繞法

參考圖 18-4 a，為簡明起見，取繞組的總槽數為 18，磁極對數等於 1，於是每極每相槽數 $q = 3$ ，是一個整數。先將在一對磁極範圍內的繞組平均分成六個區段，每區段包含 q 個槽，依次命名為 A-Z-B-X-C-Y，作為安放各相繞組的上層繞圈位

(即元件边)的槽。当绕组节距 $y_1 = \frac{7}{9} \tau$ 选定后,下层线圈边的位置随着定下来,故所有下层线圈边也相应地分成六个区段,每一对上下层相应的区段用来安置属于同一相的一组线圈,它们以其上层区段来命名。然后把属于同一相的一个极性下的绕组区段(例如A)与另一极性下的绕组区段(例如X)反接串联起来,再将此时X、Y、Z三段绕组的尾端连在一点,即成Y接法的三相绕组(如果极对数 $p > 1$,则所有同极性下的绕组区段均为正接,异极性下的绕组区段均为反接,直至结束)。这时三相绕组包含的线圈及其联接次序如下:

- A相 1—2—3—12—11—10;
- B相 7—8—9—18—17—16;
- C相 13—14—15—6—5—4。

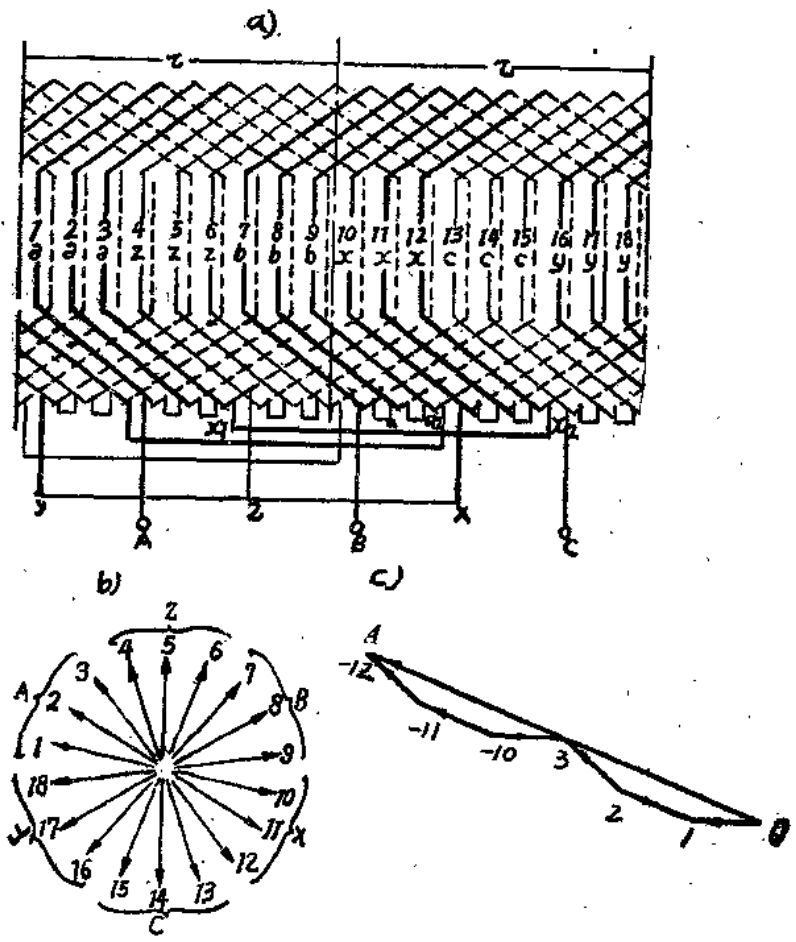


图 18-4 三相双层整数槽绕组(60°相带)

- a—展开图;
- b—绕组元件电势向量;
- c—A相电势向量

每相每一个绕组区段的宽度称作相带,由于槽距角

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}$$

而每相每区段的宽度为 $q\alpha = \frac{Z}{6p} \cdot \alpha = 60^\circ$ ，故此种绕法为 60° 相带，整个绕组共有 $2mp$ 个相带，每一相带内线圈形成一线圈组，任一相均由 $2p$ 个线圈组串联而成，因此并联支路数至多为 $2p$ 条^①。

B. 各相绕组的电势向量

电机每对磁极范围内全部绕组元件的电势向量汇合成为一个星形，示于图 18—4 D。由于 A 和 X 相带反接串联的缘故，须把 10、11 和 12 元件的电势向量转过 180° ，再与

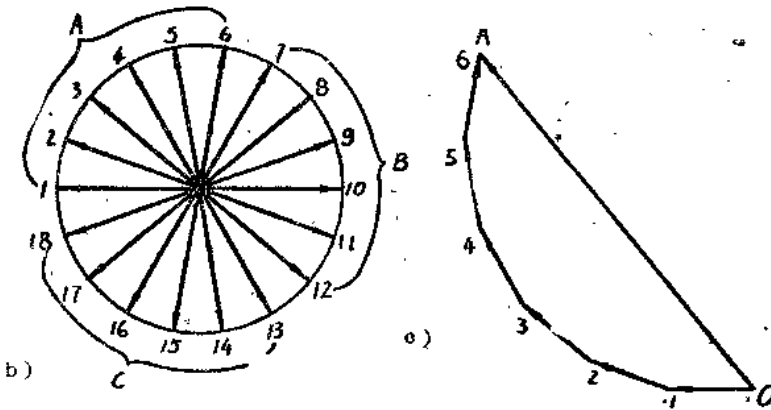
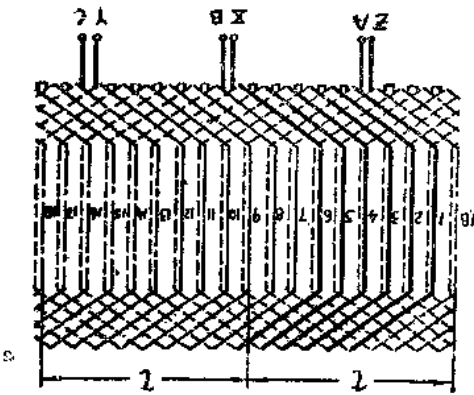


图 18—5 三相双层迭绕组 (120° 相带)

a—展开图；b—绕组元件电势向量；c—A 相电势向量

比较两种绕组的 A 相总电势，可知在同样多的线圈（同样多的用铜量）下，绕成 60° 相带的绕组的电势较 120° 相带的绕组的电势要高出约 1.16 倍。因此，现在三相绕组通常都绕成 60° 相带。

18—3 三相双层整数槽波绕组

三相双层迭绕组是交流绕组中最常用的一种，但在大容量低速水轮发电机中，采用

1、2 和 3 元件的电势向量几何相加，得到 A 相总电势向量 \overline{OA} ，见图 18—4 c；同理可求得其它各相的总电势。如磁极对数大于 1，则各对磁极范围内的电势星形互相重叠。从电势星形可以推出，A、B 和 C 三相电势在数值上相等，在相位上各相差 120° 电角度，这是对三相交流绕组的一个基本的要求。

C. 120° 相带的绕组

如果把处在每一对磁极下的绕组平均分成三个区段，分属于三相，则变为 120° 相带的绕组，如图 18—5 所示。

① 现代巨型二极汽轮发电机中有研究采用并联支路数大于 $2p=2$ 的特殊绕组连接方法，但此时各支路的电势难以保证完全平衡。

双层波繞組能大量节省綫圈組之間的联接綫。此外，双层波繞組亦常用于异步电机的綫繞轉子繞組中。

图 18—6 示异步电机的綫繞轉子繞組的展开图，为了清楚起见，仅示出一个相的连接。繞組数据为： $m=3$ ， $Z=36$ ， $p=2$ ， $q=3$ 。取繞組的节距 $y_1=\tau$ （或 9 槽距）及 $y_p=2\tau$ （或 18 槽距）。

和 18—2 节相同，先将各对极下槽数均分为六个区段后，得到属于 A 相的槽有 1—2—3，10—11—12，19—20—21 和 28—29—30，作为安放 A 相所有綫圈（即元件）的上层边的位置。假如槽 28 的上层綫圈边（以后简称 28 上）为某綫圈的一边时，则同一綫圈的另一边应在槽 1（ $28+y_1=28+9$

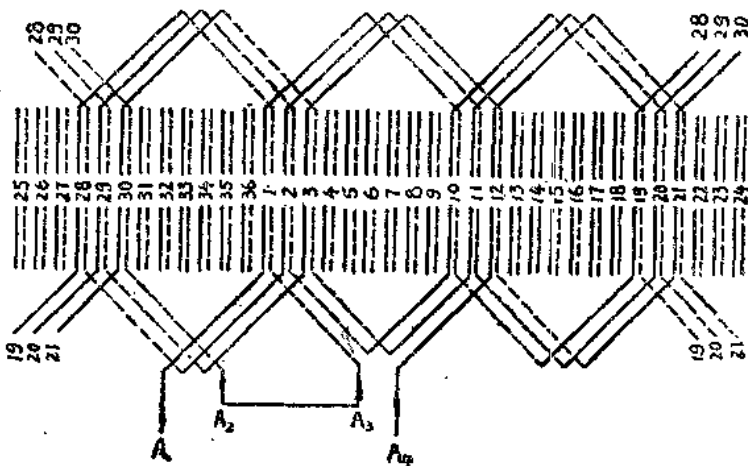


图 18—6 三相双层整数槽波繞組

$=36+1$) 的下层（以后简称 1 下）；同理，29 上和 2 下，30 上和 3 下……等分别组成一个綫圈的两边。

现在让我们以 1 上作为 A 相起端 A_1 ，并由此开始繞綫，由于取合成节距 $y=2\tau$ ，可知每当繞过 p 个綫圈后，在电机轉子圆周上前进了 $2p\tau$ 距离，正好繞行一周，使得最后一綫圈的末端又要联到为首的綫圈边，形成闭合迴路。例如，从 1 上开始，連接次序为 1 上—10 下—19 上—28 下—回到 1 上（因 $19+y_p=19+18=36+1$ ），这样就不可能繼續繞下去。此时，如将这組綫圈的最后一个綫圈的合成节距人为地放宽一个槽距，使联到綫圈边 2 上，当再繞过了一周（又繞过 p 个綫圈），复将最后一个綫圈的合成节距人为地放宽一个槽距。依此，便能繼續繞下去，其次序如下：

A_1 —1 上—10 下—19 上—28 下
 → 2 上—11 下—20 上—29 下
 → 3 上—12 下—21 上—30 下— A_2 。

繞行 q 周后（本例中 $q=3$ ），已經把 pq 个綫圈串联起来，即完成了 A 相繞組的第一部分。此后，按同样方法完成 A 相的第二部分，其連接次序如下：

A_3 —1 下—28 上—19 下—10 上
 → 2 下—29 上—20 下—11 上
 → 3 下—30 上—21 下—12 上— A_4 。

在这里，当繞至第一組綫圈末端 10 上时，应把合成节距縮減一个槽距后，才能联至 2 下。同理，繞至 11 上时，也要縮減一个槽距才能联至 3 下。

当然，上述連接不是唯一的方式，仔細观察图 18—7 可知，如果換一种繞法后，也可以使所有各組綫圈之間的連接均靠人为地縮減一个槽距来实现。比較两种繞法，前一

繞法的优点为两部分間的联结沒有交叉，而后一繞法的优点为繞圈节距的参差性較少。

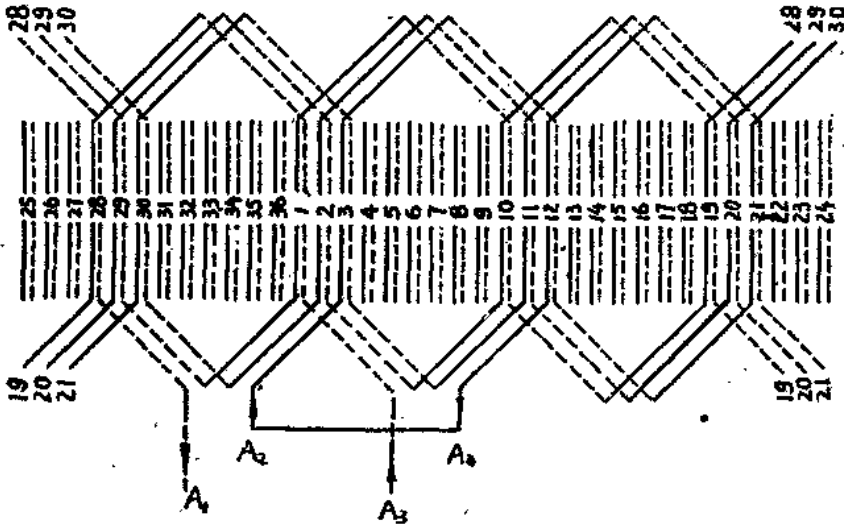


图 18—7 三相双层波繞組的又一繞法

第一部分和第二部分之間可以串联，也可以并联，視实际需要而定，串联时仅有一支路；并联时得到二支路。

在双层整数槽叠繞組里，每相的最大可能并联支路数等于电机极数 $2p$ ，因为此时每相每极下都有一个繞圈組，都可成为一条支路。在双层整数槽波繞組里，为了获得最大可能支路数 $2p$ ，必須采取所有繞圈的合成节距都放宽一个槽距，按这样连接，当繞了 q 个繞圈后，得到 q 个依次差一个槽距角 α 的电势向量相加，彷彿用了一个相帶，因此得到电势相同的 $2p$ 条支路，可以并联起来。不过这种繞法并不正常，故实际上不常采用。

观上述繞法，可以得出結論：不論在叠繞組或波繞組，所有同极性下的元件群正接，異极性下的元件群反接。

18—4 三相单层繞組

現代三相交流电机的定子繞組通常是做成双层的，单层繞組的制造工艺不便于大量生产，故应用不多。在小容量的三相电机，則有时采用单层繞組，在本节中将簡要地論述三相单层繞組的特点。

三相单层繞組通常是做成整数槽的，这种繞組基本上可分成两大类：不等距元件的和等距元件的(图18—8)。

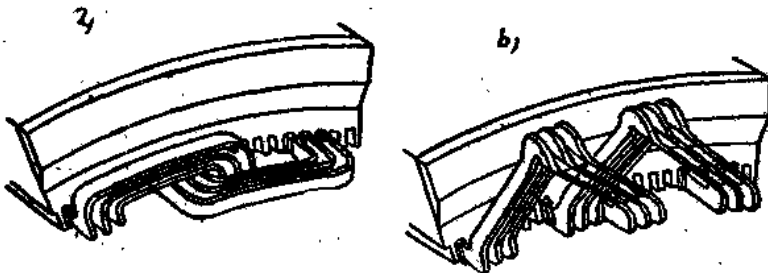


图 18—8 三相单层繞組

a—不等距元件的； b—等距元件的

1. 不等距元件的三相单层繞組 不等距元件的繞組也称同心式繞組，不同节距的繞圈(即元件)同心地一个放在另一个之内。因繞圈有不同的形状和长度，在构成繞組的并联支路时，須注意使各支

路的阻抗彼此相等。

在单层绕组里，每相在每对极下有一个线圈组，如极对数为 p ，则三相单层绕组共有 $3p$ 个线圈组。当 p 为偶数时，绕组有偶数个线圈组，线圈端部很容易布置在两个平面内。图 18-9，a 示 $p = 2$ ， $q = 2$ ， $Z = 24$ 的三相单层两平面同心式绕组，图 18-9，b 示两平面绕组的端部安排。视图可知，绕组的每一相包含着一个端部平直的线圈组和另一个端部弯屈的线圈组，故各相阻抗是相等的。

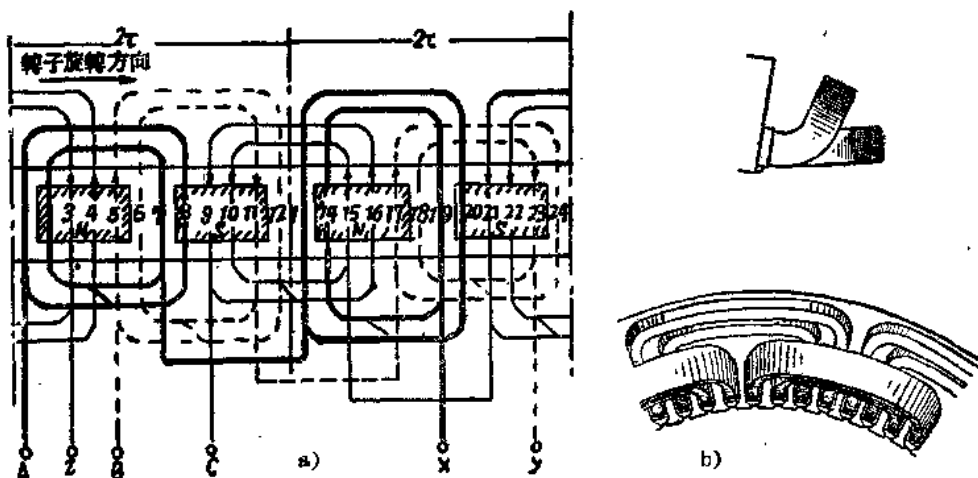


图 18-9 三相单层两平面同心式绕组
a—绕组展开图；b—绕组端部的安排

当 p 为奇数时，绕组有奇数个线圈组，将线圈端部布置在两个平面内需要有特殊的措施（用一个端部双重弯屈的线圈组），增加制造上的困难。此外，各相所包含的端部平直的和端部弯屈的线圈组的数目并不一致，因此三相阻抗也不平衡。由此可见两平面绕组应避免用于极对数为奇数的电机。

两平面绕组的优点在于端部只有两平面，可使电机不致太长。但因每一线圈组的外面几圈的端部连接过长，使绕组用铜较多，这一缺点，当电机极数少，极距 τ 和每相槽数 q 很大时，尤为显著。

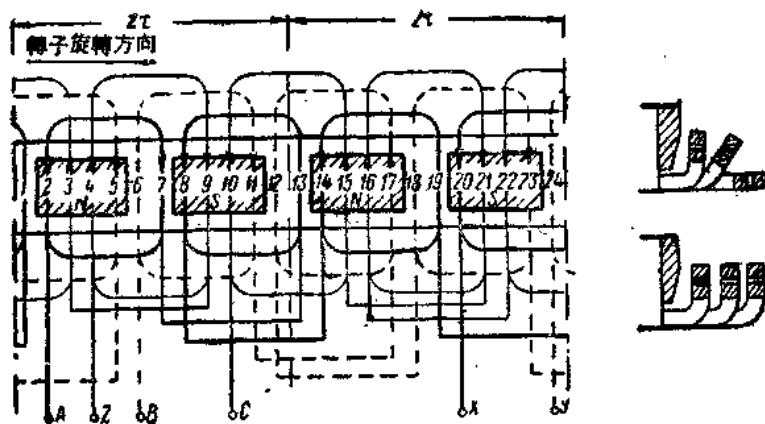


图 18-10 三相单层三平面绕组

为了免除上述两平面绕组的缺点，可采用三平面同心式绕组。这种绕组一般用于电机极数少，且 q 为偶数时。将绕组的每一个线圈组分成两个半组，线圈半组的总数增多了一倍，可将三个相绕组的端部分别安置在三个平面内。图 18-10 示三相单层三平面绕组的展开。这种绕组的缺点为端部伸出太多，致使电机太长，且修理不便。又每一相的绕组布置在一个平面内，因而三相阻抗是不平衡的。

2. 等距元件的三相单层繞組 等距元件的繞組可用鏈式繞組來代表。繞組的每一元件均作成由一長邊和一短邊所構成的梯形繞圈，並將各繞圈的端部適當地彎屈，使各不相犯，則可得到等距元件的单层繞組。由於所有繞圈同一尺寸，因此可用模型拉制，生產方便。繞組端部較短，用銅較省。此外，各繞圈組的阻抗相等，增多了可能並聯的支路數。這是一種較為通用的三相单层繞組，常用於小容量的異步電動機中。

鏈式繞組的特點為元件節距等於奇數，使奇數槽中的元件邊均為長邊（或短邊），偶數槽中的元件邊均為短邊（或長邊），於是所有元件邊一長一短地交錯排列。圖18-11示 $p = 3$ ， $q = 2$ ， $Z = 36$ ， $y = 5$ 的三相鏈式繞組的連接。圖18-12示鏈式繞組的端部安排。

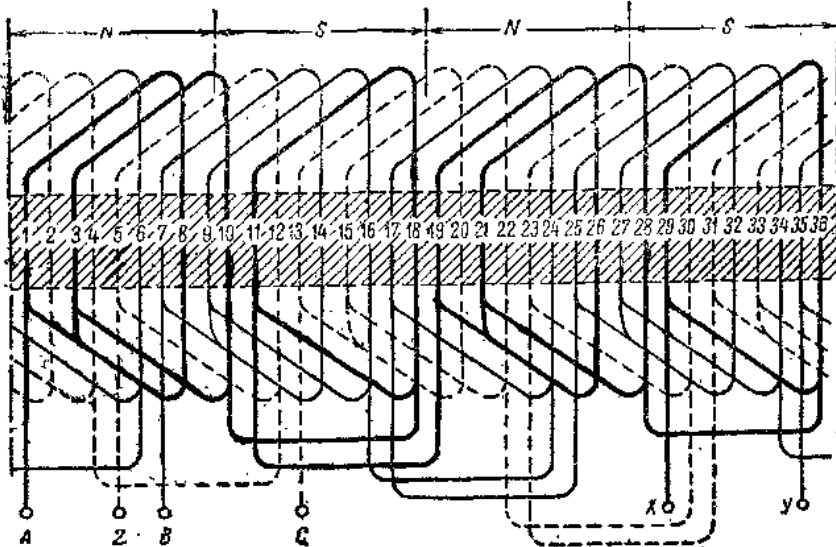


圖 18-11 三相鏈式繞組的連接

鏈式繞組的節距可為整距，也可以為短距。當每極每相槽數 q 等於偶數時，極距 τ 等於偶數個槽距，而鏈式繞組的節距須表示為奇數（槽距單位），所以在這裡就不可能等於 τ ，即此時繞組節距應採用短距。

18-5 單相交流繞組

小功率單相交流電動機在日常生活，在試驗室裡，在自動控制系統中，應用得相當廣泛，這些電動機的定子繞組多為单层繞組，其轉子繞組多數為鼠籠繞組。作為動力用途的單相異步電動機大都屬分相式，它的定子繞組具有一個主繞組和一個起動繞組，二者接至同一單相電源。作為控制用途的小功率異步電動機的定子上通常裝置一個激磁繞組和一個控制繞組，激磁繞組經常地接入單相交流電源，控制繞組則只當需要使轉子轉動時方加電壓（即所謂信號）。這兩類電動機的定子繞組實際上都是不對稱的二相繞組，但就其中單獨的一個繞組（如主繞組或激磁繞組）說來，則為單相繞組。

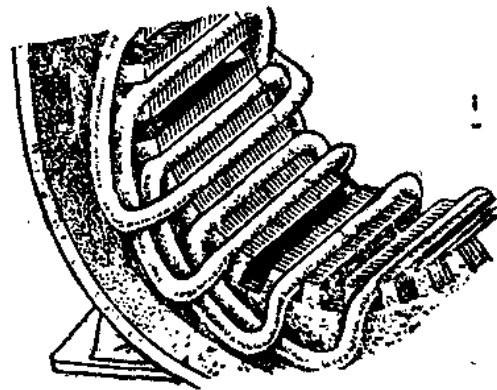


圖 18-12 鏈式繞組的端部安排

一個單相 4 極 36 槽電動機主繞組的繞圈布置如圖 18-13 所示，這裡起動繞組未畫

上。又如图 18-14 中的实线表示单相 6 极 24 槽控制用途电动机的激磁绕组的连接，而它的控制绕组则只画出首端及尾端（如图中虚线）。小功率的单相电动机多用单层绕组，因槽截面很小，用双层绕组时，层间绝缘占了槽截面的部分相当大，这就减少了槽空间的利用率。功率较大的单相电动机则可应用双层绕组。

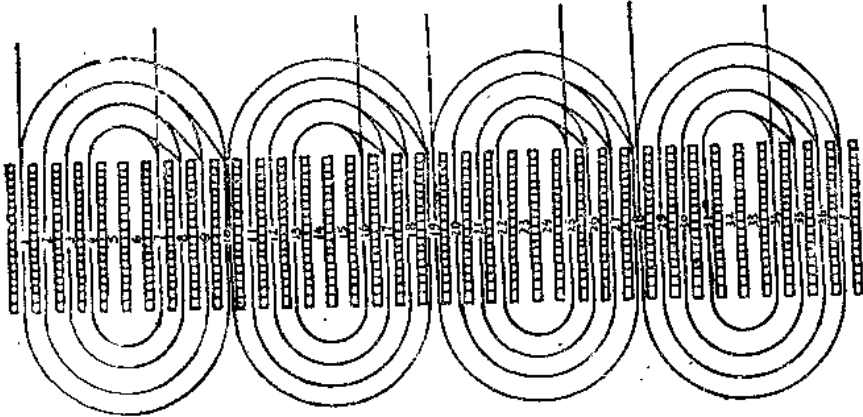


图 18-13 单相 4 极 30 槽电动机的主绕组

当选定了某一相绕组的若干槽数后，如采用不同绕法，使绕组元件边的连接次序变更，而所有串联的元件边的总数仍和原来一样，则可得与前相同的绕组电势，因电势的大小决定于所有串联元件边电势的合成值，而与元件边的连接次序无关。如图 18-15 a 表示某一单相 4 极绕组的同心式绕法，图 b 表示另一种绕法。采用图 b 绕法可以得到相同的电势，但绕组端部短了很多，且各线圈宽度一律，故此法较好。

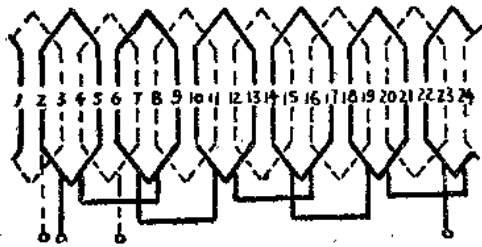


图 18-14 单相 6 极 24 槽控制用途电动机绕组的展开

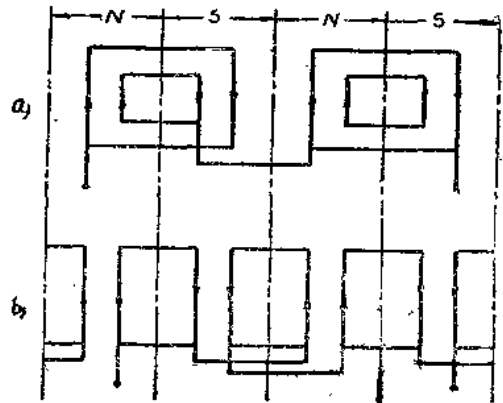


图 18-15 单相绕组的不同绕法

单相绕组至多只占有总槽数的约 $\frac{2}{3}$ ，占满全部槽数时，绕组电势增加不多，而用铜量和铜耗则显著提高，关于影响绕组相电势的各个因素将于以后几节里详细地讨论。

II、交流整数槽绕组的电势

18-6 在正弦分布磁场下的绕组电势

电机气隙中磁通密度的分布曲线称为磁场曲线。不论在同步电机或异步电机中，一般都力求使磁场曲线成为正弦形，在此情况下，电机绕组中感应电势随时间作正弦函数变化。同步电机的磁场通常系由转子上直流激磁绕组的磁势所激发。转子结构可分两种

基本型式：一种是隐极的，即转子上面没有显露的磁极；另一种是凸极的，即转子上有显露的磁极。一般异步电机的磁场是由定子方面的激磁磁势所激发，流进定子绕组的激磁电流为交流。

电机的磁场曲线实际上是略带平坦，并不完全呈正弦形，为了便于分析，可把磁场曲线分解成基波和一连串高次谐波。下面关于交流绕组感应电势的推导，是从正弦分布磁场下的绕组电势引伸到非正弦分布磁场下的电势；并首先从组成绕组的每根导线的电势出发，逐步引伸到每匝电势和元件电势，然后归结为绕组电势。又在下面的推导中，取凸极式同步电机定子绕组的感应电势作为例子，但导出的结果也适合于其它交流电机绕组的电势。

A. 每根导线的电势

图18—16为一只4极凸极式同步电机的示意图。A和X代表定子上相隔一个极距 τ 的两根导线，如将导线A和X联结起来，就组成一只整距的单匝线圈（即元件）。转子磁极上绕有激磁绕组，通入直流电后，产生激磁磁通。令转子以速度 n_1 转/秒旋转（在工程习惯上，转速往往用转/分表示），则导线A和X将感应电势。由电磁感应定律，可得导线中电势的瞬时值为：

$$e_{nr} = lvB_x$$

式中 l 为导线处在磁场中的有效长度， v 为导线对磁场相对运动的线速度， B_x 为导线所在位置的磁通密度。 v 的值决定于 n_1 ，即 $v = \pi D n_1$ ，此处 D 代表导线所在位置的圆周的直径，一般取定子内直径。

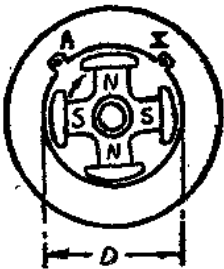


图18—16 4极同步电机示意图

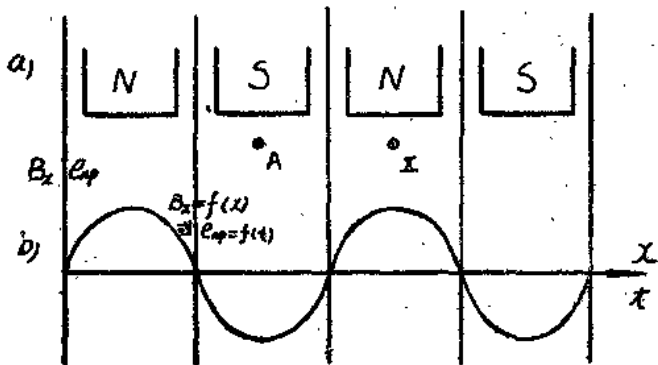


图18—17 4极同步电机的展开示意图

a—转子磁极与导线的相对位置；b—磁密分布曲线

通常电机中 l 是一定的，假如 n_1 保持不变，则 v 亦不变，故导线电势 e_{nr} 正比于磁密 B_x 。设磁密在空间作正弦形分布，如展开图18—17 b，则导线瞬时电势 $e_{nr} = f(t)$ 将随时间 t 作正弦函数变化。显然，当导线处于磁极轴线下时，电势最大，而当导线处在两极中间时（这位置称作几何中心线），电势为零。又导线X的电势 e_{nrX} 在时间关系上较导线A的电势 e_{nrA} 落后 180° （电角度）。

随时间作正弦变化的电势可用一旋转向量来表示，向量长度表示电势有效值，而它的旋转速度则取决于电势变化的频率 $f = pn_1$ 赫，或向量的旋转角速度为 $\omega = 2\pi f = 2\pi pn_1 \frac{\text{电弧度}}{\text{秒}}$ 。容易看到：转子每移一对极距 2τ 时，电势变化一周，而电势向量则转过 360 电角度（即 2π 电弧度），故可将一对极距所张的空间角度想像为 360 电角度。但实