

高等学校试用教材

电 机 学

下 册

华中工学院许实章主编

机械工业出版社

电 机 学

下 册

华中工学院 许实章 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $26\frac{3}{4}$ · 字数 658 千字

1981 年 4 月北京第一版·1981 年 4 月北京第一次印刷

印数 00,001—43,800 · 定价 2.75 元

*

统一书号: 15033 · 4863

主 要 符 号 表

下面列出下册新添的主要符号

a —— 交流绕组每相并联支路数	E_0 —— 空载电势, 励磁电势
B_v —— v 次谐波磁密	E_a —— 电枢反应电势
B_a —— 电枢反应磁场磁密	E_{ad} —— 直轴电枢反应电势
B_{ad} —— 直轴电枢反应磁场磁密	E_{aq} —— 交轴电枢反应电势
B_{aq} —— 交轴电枢反应磁场磁密	E_σ —— 定子漏电势
B_{f1} —— 励磁磁场的基波磁密	E_v —— v 次谐波电势
	F_a —— 电枢磁势 (基波幅值)

F_{ad} ——直轴电枢磁势 (基波幅值)	q ——每极每相槽数
F_{aq} ——交轴电枢磁势 (基波幅值)	R_{st} ——起动电阻
F_{f1} ——励磁磁势基波幅值	s ——转差率
f_1 ——异步电机定子频率	s_m ——发生最大电磁转矩时的转差率
f_2 ——异步电机转子频率	s_+ ——转子对正转磁场的转差率
I ——同步电机的电枢电流	s_- ——转子对反转磁场的转差率
I_d ——同步电机电枢电流的直轴分量 (直轴电流)	T_a ——定子绕组的时间常数
I_q ——同步电机电枢电流的交轴分量 (交轴电流)	T'_d ——励磁绕组的时间常数
k_e ——异步电机的电势变比	T''_d ——阻尼绕组的时间常数
k_i ——异步电机的电流变比	T_{d0} ——定子绕组和阻尼绕组都开路时的励磁绕组的时间常数
k_a ——隐极同步电机电枢磁势的折算系数	x_a ——电枢反应电抗
k_d ——直轴电枢磁密分布曲线的波形系数	x_σ ——定子漏抗
k_q ——交轴电枢磁密分布曲线的波形系数	x_t ——同步电抗
k_{ad} ——直轴电枢磁势的折算系数	x_d ——直轴同步电抗
k_{aq} ——交轴电枢磁势的折算系数	x_q ——交轴同步电抗
k_f ——励磁磁势分布曲线的波形系数	x_{ad} ——直轴电枢反应电抗
k_{q1} ——电势或磁势基波的绕组分布系数	x_{aq} ——交轴电枢反应电抗
k_{y1} ——电势或磁势基波的线圈短距系数	x'_d ——直轴瞬变电抗
k_{w1} ——电势或磁势基波的绕组系数	x''_d ——直轴超瞬变电抗
k_{qv} ——电势或磁势 v 次谐波的绕组分布系数	x_+ ——正序电抗
k_{yv} ——电势或磁势 v 次谐波的线圈短距系数	x_- ——负序电抗
k_{wv} ——电势或磁势 v 次谐波的绕组系数	x_0 ——零序电抗
k_{sk1} ——电势基波的斜槽系数	Z ——槽数, 阻抗 (复量)
k_{skv} ——电势 v 次谐波的斜槽系数	z ——复量阻抗的模 (绝对值)
k_c ——短路比	Z_1 ——异步电机定子漏阻抗 (复量)
k_v ——电压波形正弦性畸变率	Z_2 ——异步电机转子漏阻抗 (复量)
M_{pi} ——同步电动机的牵入转矩	Z_+ ——正序阻抗 (复量)
n_1 ——同步转速, 定子基波旋转磁场的转速	Z_- ——负序阻抗 (复量)
n_2 ——转子基波旋转磁场相对于转子的转速	Z_0 ——零序阻抗 (复量)
	Φ_1 ——基波磁通
	Φ_v —— v 次谐波磁通
	Φ_a ——电枢反应磁通
	Φ_{ad} ——直轴电枢反应磁通
	Φ_{aq} ——交轴电枢反应磁通
	Φ_f ——励磁磁通
	Ω_1 ——同步角速度

目 录

主要符号表

第三篇 交流电机的绕组、 电势和磁势

第十四章 交流电机的绕组和电势	1
§ 14-1 交流电机的基本工作原理	1
§ 14-2 交流绕组的基本要求和分类	3
§ 14-3 槽电势星形图	3
§ 14-4 三相双层绕组	5
§ 14-5 三相单层绕组	10
§ 14-6 在正弦分布磁场下的绕组电势	13
§ 14-7 在非正弦分布磁场下电势中的高次谐波及其削弱方法	17
§ 14-8 齿谐波电势及其削弱方法	20
§ 14-9 小结	24
第十五章 交流电机绕组的磁势	26
§ 15-1 单相绕组的脉振磁势	26
§ 15-2 三相绕组旋转磁势的基波	32
§ 15-3 时间矢量与空间矢量	37
§ 15-4 圆形和椭圆形旋转磁场	38
§ 15-5 三相绕组合成磁势的高次谐波	40
§ 15-6 三相合成磁势波形图	42
§ 15-7 小结	43

第四篇 异步电机

第十六章 异步电机的基本结构和运行状态	45
§ 16-1 异步电机的三种运行状态	45
§ 16-2 异步电机结构的主要部件	47
§ 16-3 异步电机的额定值	51
§ 16-4 我国异步电机制造概况	52
§ 16-5 小结	53
第十七章 异步电机的基本原理	54
§ 17-1 异步电机的磁路、主磁通和漏磁通	54
§ 17-2 转子静止时的异步电机	56

§ 17-3 转子旋转时的异步电机	65
§ 17-4 异步电机的等效电路	74
§ 17-5 异步电机的参数测定	78
§ 17-6 鼠笼转子的相数、极数和参数计算	81
§ 17-7 小结	84
第十八章 异步电机的功率、转矩和运行特性	86
§ 18-1 异步电机的功率和转矩平衡方程式	86
§ 18-2 异步电机的电磁转矩	90
§ 18-3 异步电动机的工作特性	97
§ 18-4 小结	99
第十九章 三相异步电动机的起动、调速和制动	101
§ 19-1 异步电动机的起动性能	101
§ 19-2 三相异步电动机的起动方法	102
§ 19-3 深槽式和双鼠笼异步电动机	108
§ 19-4 异步电动机的附加转矩及其对起动的的影响	110
§ 19-5 异步电动机的调速	117
§ 19-6 异步电动机的制动方法	127
§ 19-7 小结	129
第二十章 三相异步电动机在不对称电压下运行及单相异步电动机	131
§ 20-1 三相异步电动机在不对称电压下运行	131
§ 20-2 单相异步电动机	134
§ 20-3 小结	138
第二十一章 异步发电机及特种异步电机	140
§ 21-1 异步发电机	140
§ 21-2 自整角机	142
§ 21-3 交流伺服电动机	145
§ 21-4 交流测速发电机	147

§ 21-5 回转变压器·····148	§ 24-7 稳态参数的测定·····218
§ 21-6 感应调压器·····148	§ 24-8 小结·····219
§ 21-7 利用电磁滑差离合器调速的 异步电动机·····151	第二十五章 同步发电机的并联运行·····222
§ 21-8 直线异步电动机·····152	§ 25-1 并联投入的条件和方法·····222
§ 21-9 单相串励换向器电动机·····157	§ 25-2 同步发电机的功率和转矩平 衡方程式·····226
§ 21-10 转子馈电式的三相并励 电动机·····159	§ 25-3 同步电机的功角特性·····227
§ 21-11 小结·····162	§ 25-4 同步发电机与大电网并联 运行时有功功率的调节和静 态稳定·····230
第五篇 同步电机	§ 25-5 无功功率的调节和V形曲线·····234
第二十二章 同步电机的基本结构·····163	§ 25-6 两容量相近同步发电机并 联运行的特点·····236
§ 22-1 同步电机的基本结构型式·····163	§ 25-7 小结·····238
§ 22-2 隐极同步电机的基本结构·····164	第二十六章 同步电动机和同步调 相机·····240
§ 22-3 凸极同步电机的基本结构·····169	§ 26-1 同步电动机的基本方程式、 矢量图和功角特性·····240
§ 22-4 同步电机的冷却系统简介·····174	§ 26-2 无功功率的调节·····243
§ 22-5 同步电机的励磁方式·····177	§ 26-3 同步电动机的起动方法·····244
§ 22-6 额定值·····180	§ 26-4 同步调相机·····248
§ 22-7 我国同步电机的制造概况·····180	§ 26-5 小结·····249
§ 22-8 小结·····181	第二十七章 同步发电机的不对 称运行·····251
第二十三章 同步电机的基本原理·····183	§ 27-1 不对称运行时同步发电机的 各相序阻抗和等效电路·····251
§ 23-1 同步发电机的空载运行·····183	§ 27-2 三相同步发电机的不对称稳 定短路·····256
§ 23-2 电压波形正弦性畸变率·····185	§ 27-3 负序和零序参数的测定·····260
§ 23-3 对称负载时的电枢反应·····185	§ 27-4 不对称运行对电机的影响·····262
§ 23-4 隐极同步发电机的电势方 程式、同步电抗和矢量图·····190	§ 27-5 小结·····263
§ 23-5 凸极同步发电机的双反应理论·····196	第二十八章 同步电机的突然短路·····265
§ 23-6 凸极同步发电机的电势方程 式、同步电抗和矢量图·····199	§ 28-1 超导体闭合回路磁链守恒 原理·····265
§ 23-7 小结·····203	§ 28-2 对称突然短路的物理过程·····266
第二十四章 同步发电机的运行特性·····205	§ 28-3 瞬变电抗和超瞬变电抗及其 测定方法·····276
§ 24-1 同步发电机基本特性的定义·····205	§ 28-4 突然短路电流及其衰减时间 常数的计算·····275
§ 24-2 同步发电机的空载特性和短路 特性·····206	§ 28-5 不对称突然短路概念·····282
§ 24-3 同步发电机的零功率因数负载 特性·····207	§ 28-6 突然短路对电机的影响·····283
§ 24-4 同步发电机的短路比和直轴同 步电抗·····210	§ 28-7 小结·····284
§ 24-5 同步发电机的外特性和调节特 性·····212	
§ 24-6 电压变化率和额定励磁磁势的求 法·····214	

第二十九章 同步电机的振荡286

§ 29-1 同步电机振荡的物理过程286

§ 29-2 同步电机在振荡过程中的
转矩平衡方程式288

§ 29-3 自由振荡和阻尼绕组的作用291

§ 29-4 动态稳定概念293

§ 29-5 强迫振荡概念298

§ 29-6 小结301

第三十章 其他同步电机303

§ 30-1 磁阻同步电动机303

§ 30-2 步进电动机305

§ 30-3 异步电机的同步化运行308

§ 30-4 爪极同步电机309

总结 电机运行中电、磁、力
各方面的共同特点

§ S-1 电机中的磁场能量312

§ S-2 电磁转矩318

§ S-3 电势平衡关系335

§ S-4 磁势平衡关系339

§ S-5 转矩平衡关系341

§ S-6 功率平衡关系342

附录 II 分数槽绕组344

§ I-1 分数槽绕组的连接法344

§ I-2 分数槽绕组的特征345

§ I-3 分数槽绕组的对称条件及并联
支路数349

§ I-4 分数槽绕组的轮换数350

§ I-5 用方格图确定波绕组的连
接法353

附录 III 齿谐波电势356

§ III-1 气隙中任一旋转磁势波产生的
磁场分析356

§ III-2 电势中的齿谐波电势358

§ III-3 产生齿谐波电势的磁场的性质362

§ III-4 削弱齿谐波电势的方法364

附录 IV 异步电机的准确圆图367

§ IV-1 准确圆图的原理367

§ IV-2 准确圆图上各种物理量的
表示法370§ IV-3 根据空载和短路试验数据作
准确圆图376§ IV-4 异步电机的较准确圆图和
简化圆图380

附录 V 单绕组多速异步电动机382

§ V-1 槽号相位图的画法382

§ V-2 用“极幅调制”实现反向
法变极384§ V-3 用“对称轴线法”实现反向
法变极389§ V-4 用“对称轴线法”设计非正
规变极绕组394§ V-5 用“对称轴线法”实现换
相法变极399

附录 VI 同步发电机的励磁方式406

§ VI-1 励磁系统的作用和分类406

§ VI-2 直流励磁机407

§ VI-3 交流励磁机410

§ VI-4 相复励原理412

§ VI-5 自励式半导体励磁方式416

§ VI-6 三次谐波励磁方式418

编后记422

第三篇 交流电机的绕组、电势和磁势

交流旋转电机主要分为同步电机和异步电机两类。按转子结构形式的不同，同步电机又分为凸极同步电机和隐极同步电机；异步电机又分为鼠笼式异步电机、绕线式异步电机和换向器式异步电机。同步电机主要用作发电机，也用作电动机或调相机。异步电机主要用作电动机，有时也用作发电机。两类电机虽然激磁方式和运行特性有很大差别，但电机内部发生的电磁现象和机电能量转换的原理却基本上是相同的，因此存在许多共同性的问题，可以统一起来进行研究；这就是本篇所要研究的交流电机的绕组、电势及磁势等问题。这些问题对以后分别研究异步电机和同步电机的运行性能有着重要的意义。

第十四章 交流电机的绕组和电势

如同直流电机一样，交流电机绕组的功用也是感应电势、流过电流和产生电磁转矩，达到进行机电能量转换的目的，所以它是电机的重要部件。

本章先介绍交流电势的特点，由此导出交流绕组的绕制方法，再分析绕组电势的计算方法和电势中的谐波。

为了了解绕组及其电势在具体电机中的作用，先介绍同步电机和异步电机的基本工作原理。

§ 14-1 交流电机的基本工作原理

一、同步电机的基本工作原理

以发电机为例来说明。同步电机和直流电机类似，也由定子和转子两部分组成，定、转子之间有气隙，如图 14-1 所示。定子上有 AX 、 BY 、 CZ 三相绕组，它们在空间上彼此相差 120° 电角度，每相绕组的匝数相等。转子磁极（简称主极）上装有励磁绕组，由直流励磁，其磁通从转子 N 极出来，经过气隙、定子铁心、气隙，进入转子 S 极而构成回路，如图 14-1 中虚线所示。

如果用原动机拖动发电机沿反时针方向恒速旋转，则磁极的磁力线将切割定子绕组的导体，由电磁感应定律可知，在定子导体中就会感应出交变电势。设磁极磁场的气隙磁密沿圆周按正弦规律分布，则导

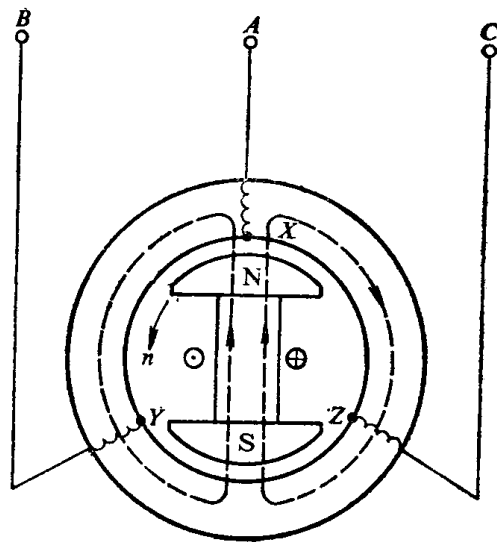


图14-1 同步发电机的工作原理图

体电势也随时间按正弦规律变化, 即

$$e_c = B_a l v = B_m l v \sin \omega t = E_{cm} \sin \omega t \quad (14-1)$$

式中 $E_{cm} = B_m l v$ 是导体电势的最大值, B_a 为导体所在处的磁密, B_m 为正弦波磁密的最大值, l 为磁力线切割导体的长度, v 为磁力线切割导体的线速度, $\omega = 2\pi f$, f 是电势的频率。

由于三相绕组在空间彼此互差 120° 电角度, 在图 14-1 所示转向下, 磁力线将先切割 A 相绕组, 再切割 B 相, 最后切割 C 相。因此, 定子三相电势大小相等, 相位彼此互差 120° 。设相电势的最大值为 E_m , A 相电势的初相角为零, 则三相电势的瞬时值为:

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (14-2)$$

三相电势的波形如图 14-2 所示。

从图 14-2 和式 (14-1) 及式 (14-2) 可见, 多相交流电势存在大小、频率、波形和对称等问题, 这些内容将在本章中详细讨论。

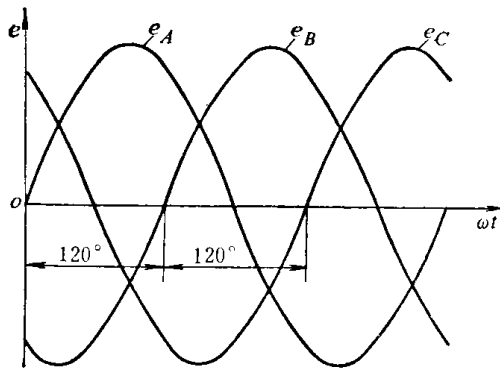


图14-2 三相电势波形

电势的频率可这样决定: 当转子为一对极时, 转子旋转一周, 绕组中的感应电势正好交变一次 (即一周波); 当电机有 p 对极时, 则转子旋转一周时, 感应电势交变 p 次 (即 p 个周波); 设转子每分钟转数为 n , 则转子每秒钟旋转 $\frac{n}{60}$ 转, 因此感应电势每秒交变 $\frac{pn}{60}$ 次, 即电势的频率为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (\text{赫}) \quad (14-3)$$

从上式可见, 感应电势的频率 f 等于电机的极对数 p 与转子每秒钟的转速 $\frac{n}{60}$ 的乘积。我国国家标准规定工业交流电势的频率为 50 赫, 因此电机的极数和转速成反比关系。例如, 在汽轮发电机中, 如果 $n = 3000$ 转/分, 电机为一对极; $n = 1500$ 转/分, 电机为两对极。所以转速越低则极对数越多。在水轮发电机中, 如果 $n = 100$ 转/分, 则电机为 30 对极。

如果在图 14-1 所示三相绕组的出线端接上三相负载, 便有电能输出, 也就是说发电机把机械能转换成电能。

从式 (14-3) 可见, 同步电机的转速 n 和电网频率 f 之间有严格不变的关系, 即当电网频率 f 一定时, 电机的转速 $n = \frac{60f}{p}$ 为一恒值, 而异步电机就不是这样, 这是同步电机和异步电机的基本差别。

二、异步电机的基本工作原理

以电动机为例来说明。从结构上讲, 异步电机和同步电机的定子是一样的, 只有转子结构不同而已。图 14-3 为一鼠笼式异步电动机的原理图。转子槽内有导体, 导体两端用短路环连接起来, 形成一个闭合的绕组。当定子绕组加上对称的三相交流电压后, 定子三相绕组中便有对称的三相电流通过, 它们联合产生一个定子旋转磁场 (将在第十五章中讨论), 在图 14-3 中用 N 、 S 极表示。设定子旋转磁场以转速 n_1 (称为同步转速) 沿反时针方向旋转, 则它的磁力线将切割转子导体而感应电势。电势的方向可用右手定则或图 0-9 所示方法确定。如

图 14-3 中的叉和点所示。在该电势的作用下, 转子导体内便有电流通过, 电流的有功分量与电势同相位。于是, 由电磁力定律可知, 转子导体电流与旋转磁场相互作用使转子导体受到电磁力 f , 它的方向可由左手定则或图 0-14 所示方法确定, 如图 14-3 所示。在该电磁力的作用下, 电动机转子就转动起来, 其转向与旋转磁场的方向相同。这时, 如果在转子轴上加上机械负载, 电动机就拖动机械负载旋转, 输出机械功率, 也就是说, 电动机把电能转换成机械能。

异步电动机的转速不可能达到定子旋转磁场的转速, 即同步转速; 因为如果达到同步转速, 则转子导体与旋转磁场之间没有相对运动, 随之在转子导体中不能感应出电势和电流, 也就不能产生推动转子旋转的电磁力。因此, 异步电动机的转速总是低于同步转速, 即两种转速之间总是存在差异, 异步电动机因此而得名。

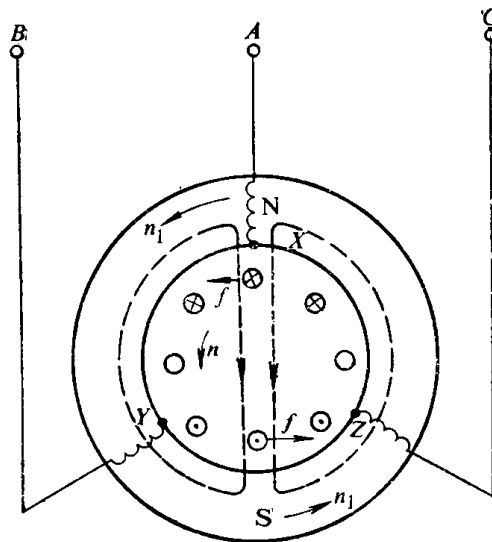


图14-3 异步电动机的工作原理图

§ 14-2 交流绕组的基本要求和分类

对交流绕组的基本要求是: (1) 在一定导体数下, 获得较大的基波电势和基波磁势; (2) 在三相绕组中, 对基波说, 三相电势和磁势必须对称, 即三相大小相等而相位上互差 120° ; 并且三相的阻抗也要求相等; (3) 电势和磁势波形力求接近正弦波, 为此要求电势和磁势中的谐波分量尽可能小; (4) 用铜量少, 绝缘性能和机械强度可靠, 散热条件好; (5) 制造工艺简单, 检修方便。

交流电机的绕组, 按绕组的相数、槽内层数、每极每相槽数的不同可分为: (1) 按相数分为单相、两相、三相和多相绕组; (2) 按槽内层数分为单层绕组和双层绕组, 双层绕组又分为迭绕组和波绕组, 单层绕组又分为等元件、交叉式和同心式绕组等; (3) 按每极每相槽数是整数还是分数分为整数槽绕组和分数槽绕组。

交流电机绕组的种类虽然很多, 但现代主要采用三相双层绕组, 因为它能较好地满足上述要求。因此, 本章重点讨论每极每相整数槽的双层绕组, 其他绕组只作一般介绍。

槽电势星形图是分析绕组的一个有效方法, 特别是用于分析比较复杂的绕组 (如分数槽绕组、变极调速绕组等) 时, 概念比较清楚, 所以下面先介绍槽电势星形图。

§ 14-3 槽电势星形图

当把电枢上各槽内导体按正弦规律变化的电势分别用矢量表示时, 这些矢量构成一个辐射星形图, 称为槽电势星形图。下面用一个具体例子来说明。

例14-1 图 14-4 是一台三相同步发电机定子槽内导体沿圆周分布情况, 已知 $2p = 4$, $Z = 36$, 试绘出槽电势星形图。

解 在图 14-4 中, 相邻两槽间的距离以电角度表示时, 称为槽距电角, 以 α_1 表示。由

于整个电枢圆周为 360° 机械角度, 以电角度计算时, 一对极距范围就等于 360° 电角度。当电机有 p 对极时, 则电枢圆周应为 $p360^\circ$ 电角度, 因此, 槽距电角

$$\alpha_1 = \frac{p360^\circ}{Z} \quad (14-4)$$

式中 p 是电机的极对数, Z 是电枢槽数。对所举例子来说

$$\alpha_1 = \frac{p360^\circ}{Z} = \frac{2 \times 360^\circ}{36} = 20^\circ$$

假设磁极磁场的磁密沿气隙圆周按正弦规律分布, 转子沿反时针方向恒速旋转, 由式(14-1)可知, 定子各槽内导体的感应电势将随时间按正弦规律变化。由于各槽在空间彼此互差 α_1 电角度, 因此各导体电势在时间相位上也彼此互差 α_1 角度。于是, 假设 1 号槽的导体电势以矢量 1 表示 (见图 14-5 a), 则在图示的转子转向下, 2 号槽的导体电势矢量 2 比矢量 1 滞后 20° 。同理矢量 3 比矢量 2 滞后 20° 。依此类推, 就可绘出图 14-5 a) 所示的槽电势星形图。从图

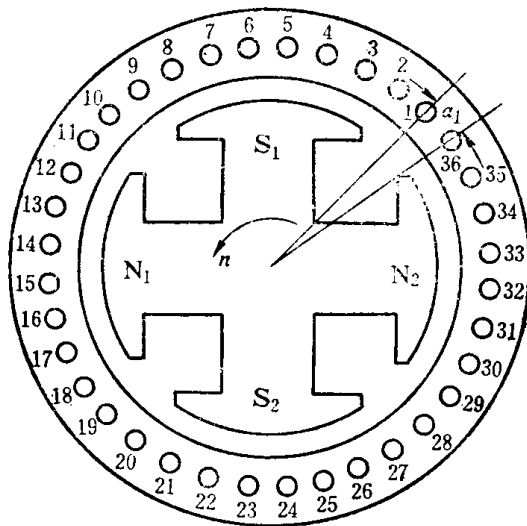


图14-4 槽内导体沿定子圆周的分布情况

图 14-5 a) 所示的槽电势星形图。从图

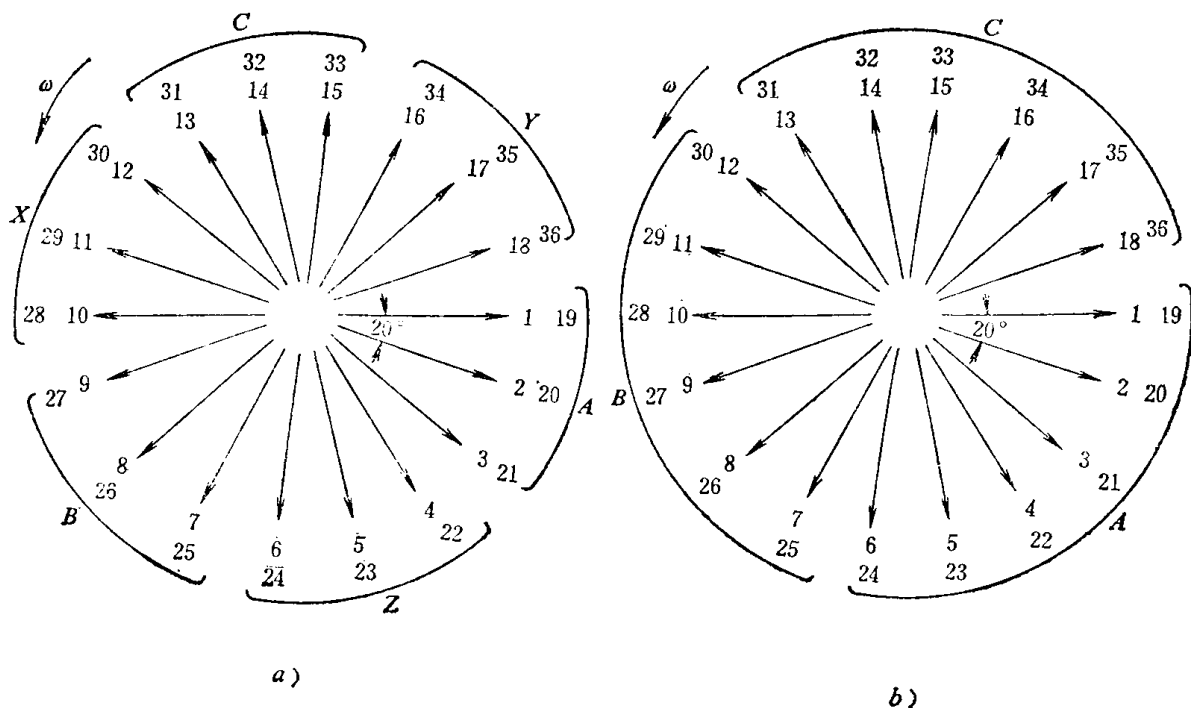


图14-5 槽电势星形图

a) 60° 相带 b) 120° 相带

可见, 19、20、21……等矢量与 1、2、3……等矢量分别重合, 这是由于它们在磁极下分别处于对应的位置, 所以它们的感应电势同相位。一般说, 对于每极每相整数槽绕组, 如果电机有 p 对极, 则有 p 个重迭的槽电势星形。普遍地说, 当 p 和 Z 有最大公约数 t 时, 则有 t 个重合的槽电势星形。对本例题而言, p 和 Z 的最大公约数为 2, 故有两个重合的槽电势星形。

§ 14-4 三相双层绕组

三相双层绕组有迭绕组和波绕组两种。这里主要讨论如何用槽电势星形图分析迭绕组的连接方法，关于波绕组只介绍其特点和连接规律。

一、迭绕组

交流电机的迭绕组和直流电机中的单迭绕组一样，任何两个相邻的线圈都是后一个迭在前一个的上面。然后把属于同一相的相邻线圈直接串联起来，再通过一定的连接法构成三相绕组。下面用一实例来说明。

例14-2 已知： $Z = 36$ ， $2p = 4$ ，试绘制一个并联支路数 $a = 1$ 的三相双层迭绕组展开图。

解 绘展开图的步骤是：（1）绘槽电势星形图；（2）分相；（3）绘绕组展开图（即把各相导体按一定规律连接成对称三相绕组）。现分述如下。

（一）绘槽电势星形图 由于本例题的极数、槽数与图 14-4 相同，故槽电势星形图与图 14-5 完全相同。

在双层绕组中，上层线圈边的电势星形与槽电势星形完全相同。下层线圈边的位置取决于线圈的节距。如果我们把各个线圈的上层边电势矢量与下层边电势矢量相减，使得各线圈的电势矢量，它们也构成一个电势星形，相邻两矢量间相位差也是 α_1 。所以在双层绕组里，槽电势星形的每一个矢量既可以假定为槽内上层线圈边的电势矢量也可以假定为一个线圈的电势矢量。在下面的分析中就是把它看成一个线圈的电势矢量，如矢量 1 是上层边嵌于槽 1 的线圈的电势矢量。

（二）分相 所谓分相，就是在星形图上划分各相所属槽号。分相的原则是使每相电势最大，且三相电势对称。为了使三相电势相等，每相在每极下应占有相等的槽数，该槽数称为每极每相槽数，以 q 表示

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (14-5)$$

式中 m 是相数。对本例题而言，

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \times 2 \times 3} = 3$$

根据分相原则和每极每相槽数 q ，就可在星形图（图 14-5 a）上进行分相。

以 A 相为例，由于 $q = 3$ ，A 相在每个极下应占有三槽。在第一对极距范围内，如果在 S_1 极下将 1、2、3 三个槽划归 A 相，在旁边标以字母 A，如图 14-5 a 所示。为了使每相合成电势最大，则应把 N_1 极下的 10、11、12 三个槽也划归 A 相，标以字母 X。类似地把第二对极距范围内的 19、20、21 和 28、29、30 等六个槽也划归 A 相。

同理，为了使三相绕组对称，应将距 A 相 120° 处的 7、8、9、16、17、18 和 25、26、27、34、35、36 等划归 B 相。而将距 A 相 240° 处的 13、14、15、22、23、24 和 31、32、33、4、5、6 等槽划归 C 相。

上述分相的特点是把每极下的电枢表面分为三等分，每相占一等分，故称每一等分为一

相带。这里因每一相带宽度相当于 $\frac{180^\circ}{m} = \frac{180^\circ}{3} = 60^\circ$ 电角度，故称为 60° 相带。

除上述分相方法外，也可选 1、2、3、4、5、6 和 19、20、21、22、23、24 等 12 个槽作为 A 相，7、8、9、10、11、12 和 25、26、27、28、29、30 作为 B 相，以及 13、14、15、16、17、18 和 31、32、33、34、35、36 作为 C 相，而得到一个三相对称的 120° 相带绕组，如图 14-5 b) 所示。由于 60° 相带绕组的合成电势比 120° 相带的大，故除了单绕组变极电机外，一般都用 60° 相带绕组。

同理，每一相带可取 30° 电角度。这时每对极下有 12 个相带，可以接成十二相，也可以接成六相，即把 12 个相带接成两个星形连接的三相绕组，每一个星形的每相绕组由相距 180° 电角度的两个相带组成，而两个星形之间彼此位移 30° 电角度。这种六相 30° 相带绕组，实际上是把通常按星形连接的三相 60° 相带绕组的每一相带等分为两个相带，把一个星形变成两个星形，彼此位移 30° ，因此又称为六相双 Y 移 30° 绕组。

六相双 Y 移 30° 绕组用于超巨型汽轮发电机和带整流负载的同步发电机上有突出优点。对于汽轮发电机，这是提高电机效率、减小绕组振动和提高电机极限容量的有效措施。国外已用于 120 万千瓦的两极汽轮发电机上。对于带整流负载的同步发电机，采用这种绕组可使整流系统产生的线电流中的高次谐波对发电机的危害显著减小，因此这种绕组已被广泛用于核物理研究中的供电发电机上。

(三) 绘绕组展开图 绘绕组展开图就是根据星形图上分相的结果，把属于各相的导体按一定规律连接起来，组成三相绕组。绘展开图时，把电枢从齿中心沿轴向剖开，展成一平面，磁极在上面，如图 14-6 所示。由于原来编号是沿反时针编的（图 14-4），故展开后按自左至右编号。编号的原则是线圈和线圈的上层边所在的槽编为同一号码。绘图时，上层边用实线表示，下层边用虚线表示。其次把展开图上的槽分为 $2p$ 等分，根据右手定则，或图 0-9 所示方法，标出各槽内导体电势的方向。然后，选择线圈节距，以 y_1 表示。设电机极距为 τ ，以槽数计算时极距

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (\text{槽}) \quad (14-6)$$

对本例题， $\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{2 \times 2} = 9$ 槽。则当 $y_1 = \tau$ 时，称为整距绕组；当 $y_1 > \tau$ 或 $y_1 < \tau$ 时，分别称为长距或短距绕组。为了改善电势波形以及节省材料，通常采用短距绕组。

设选用短距绕组，取 $y_1 = 7$ 槽，则第一槽的上层导体与第八槽的下层导体连接起来构成第一个线圈，余类推（图 14-6 a）。在双层绕组中，因为每槽放两个线圈边，而一个线圈有两个线圈边，所以线圈数等于槽数。在本例题中， $Z = 36$ ，故有 36 个线圈。这时图 14-5 a) 所示的 36 根矢量可以认为是 36 个线圈的电势矢量。

以 A 相为例，根据图 14-5 a) 中 A 相所属的线圈矢量，把上层边在第一个极下的 1、2、3 三个线圈串联起来（线圈 1 的尾与线圈 2 的头接在一起，余类推）得到一个线圈组。类似地，把在其他极下属于 A 相的 10、11、12；19、20、21；28、29、30 等线圈分别串联起来构成另外三个线圈组。这样，A 相共有四个线圈组，如图 14-6 a) 所示。

从图 14-5 a) 可见，每个线圈组的合成电势大小相等，相位相同或相反，故每个线圈组可以独立成为一条支路。这样，对每极每相整数槽双层迭绕组，如果电机有 $2p$ 个磁极，每相便有 $2p$ 个线圈组，故每相最大并联支路数 $a_{\max}$ 等于极数，即

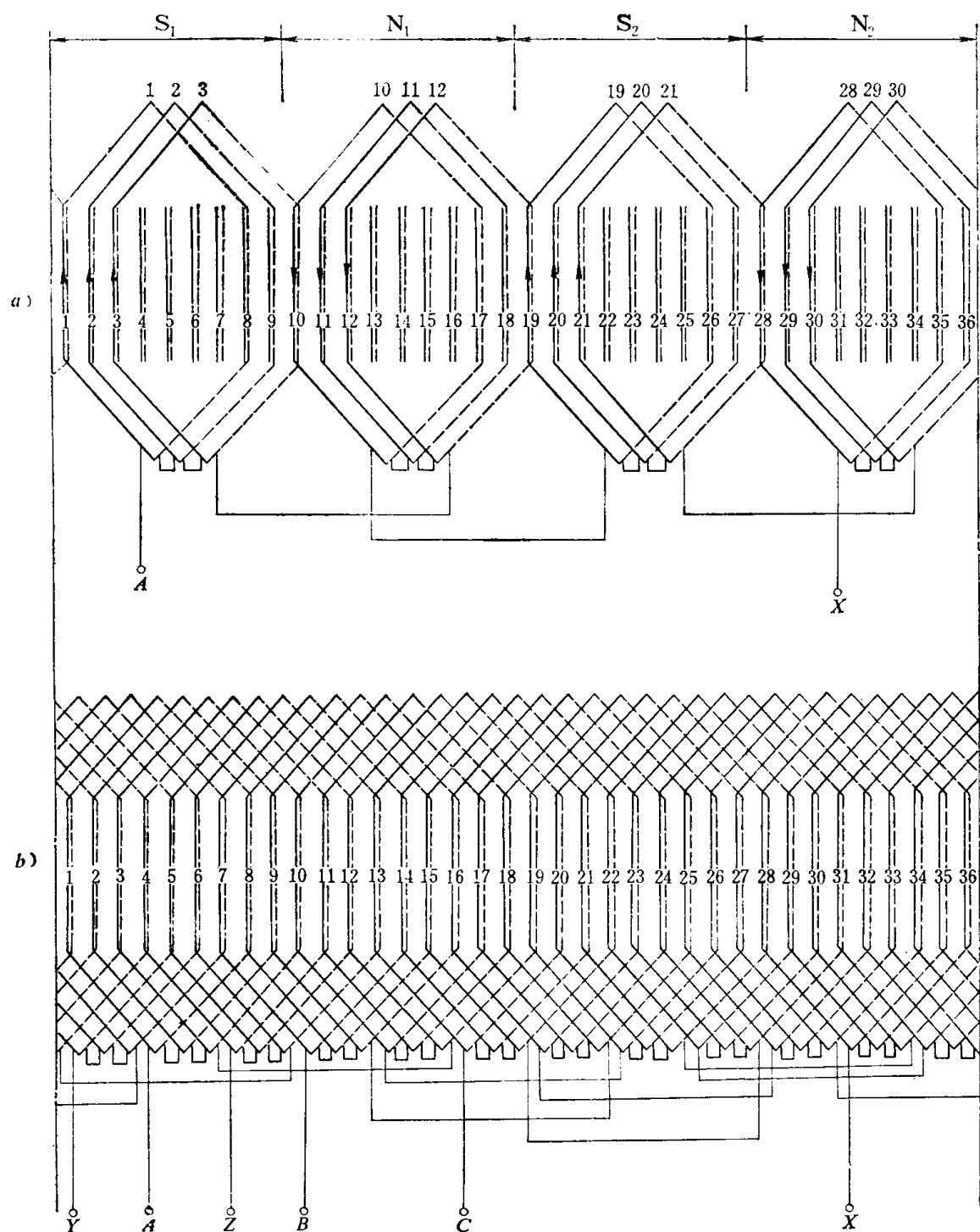
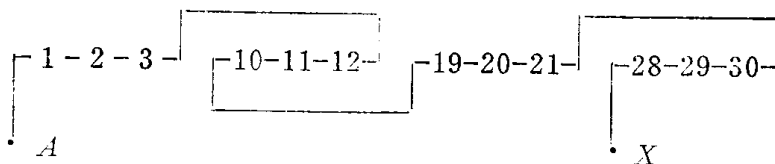


图14-6 三相双层迭绕组展开图

$2p = 4, Z = 36, a = 1$ a) A相展开图 b) 三相展开图

$$a_{max} = 2p \tag{14-7}$$

对具体电机而言，各线圈组是串联还是并联，视所选并联支路数 a 而定。在本例题中，因要求 $a = 1$ ，所以四个线圈组应该串联成一条支路。由于不同极性下的线圈组电势方向相反（见图 14-5 a 和图 14-6 a），为了使整个绕组的电势相加，线圈组串联时应采用“尾接尾，头接头”的规律。这样就连成了 A 相绕组，如图 14-6 a) 所示。这时 A 相所包括的十二个线圈的串联次序如下表所示：



同理，根据星形图上划分的 B 相和 C 相所属线圈矢量，按同样规律连接起来，便构成 B 相和 C 相绕组。这样，可得三相绕组的展开图如图 14-6 b) 所示。

迭绕组的优点是短距时能节省端部用铜和便于得到较多的并联支路。缺点是线圈组之间的连接线较长，在多极电机中这些连接线用铜量很大。迭绕组的线圈一般为多匝线圈，主要用在 10 千瓦以上的中、小型同步电机和异步电机以及大型同步电机的定子绕组中。

二、波绕组

交流电机的波绕组和直流电机的波绕组类似，任何两个串联线圈沿绕制方向象波浪似地前进。和直流电机一样，我们用合成节距 y 来表征波绕组的连接规律，它说明每串联一个线圈时，绕组沿绕制方向前进多少槽。由于波绕组是依次把同极性下的线圈串联起来，每次前进约一对极距 (2τ)。故对整数槽波绕组来说，合成节距 y 通常选为一对极距，即

$$y = \frac{Z}{p} = 2mq \text{ (槽)}$$

但当合成节距这样选择时，在绕组串联 p 个线圈（沿定子绕了一周）后，绕组将回到原来出发的槽号而自行闭合。因此，为了把所有属于同一相的线圈全部连接起来，每绕完一圈之后，必须人为地前进或后退一个槽，才能使绕组继续地绕下去。下面用具体例子来说明。

例 14-3 试将例题 14-2 绘成三相双层波绕组展开图。

解 绘波绕组展开图的步骤与绘迭绕组的完全相同。由于本例题与例题 14-2 有相同的槽数和极数，故槽电势星形图和分相结果与例题 14-2 完全相同，见图 14-5 a)，这里不再重复。

绘波绕组展开图时，首先应确定线圈的各种节距，设选合成节距

$$y = \frac{Z}{p} = \frac{36}{2} = 18 \text{ (槽)}$$

第一节距

$$y_1 = 7 \text{ (槽)}$$

则第二节距

$$y_2 = y - y_1 = 18 - 7 = 11 \text{ (槽)}$$

现以 A 相为例说明具体接法。设从 S_1 极下槽 3 开始，按节距 y_1 , y_2 和 y 进行连接，如图 14-7 所示，连接顺序如下： A_1 (头)——3 上——(3 + 7 = 10 下)——(10 + 11 = 21 上)——(21 + 7 = 28 下)，这样绕过了两对极，即沿电枢表面绕过了一周。如果这时第二节距 y_2 仍用 11 槽，则绕组将接到 28 + 11 = 39 = 36 + 3，即回到 3 号槽的上层边而自行闭合。为了使绕组能继续绕下去，在绕第二圈时，把 y_2 缩短一槽，即使 $y_2 = 10$ ，使第二圈从第二槽的上层边开始往下绕，即 (28 + 10 = 36 + 2，即 2 上)——(2 + 7 = 9 下)——(9 + 11 = 20 上)——(20 + 7 = 27 下)。又将 y_2 缩短一个槽距，使第三圈从 1 号槽的上层边往下绕，即 (27 + 10 = 36 + 1，即 1 上)——(1 + 7 = 8 下)——(8 + 11 = 19 上)——(19 + 7 = 26 下)—— A_2 (尾)。至此，绕完了所有上层边在 S 极下属于 A 相的六个线圈，构成 A 相绕组的一半。

同理，再从 N_1 下把 A 相所属的槽按同样方法进行连接，其顺序为： X_1 (头)——12 上——
 $(12 + 7 = 19$ 下)—— $(19 + 11 = 30$ 上)—— $(30 + 7 = 36 + 1$ 下)—— $(1 + 10 = 11$ 上)——
 $(11 + 7 = 18$ 下)—— $(18 + 11 = 29$ 上)—— $(29 + 7 = 36$ 下)—— $(36 + 10 = 36 + 10$ 上)——
 $(10 + 7 = 17$ 下)—— $(17 + 11 = 28$ 上)—— $(28 + 7 = 35$ 下)—— X_2 (尾)，绕完了所有上层边
 在 N 极下属于 A 相的六个线圈，构成 A 相绕组的另一半。由于这两半 A_1-A_2 和 X_1-X_2 的
 电势方向相反，因此串联成一条支路时，应采用“尾接尾”，即 A_2 和 X_2 连接在一起。这样可
 得 A 相十二个线圈的串联次序如下表：

A (头) — A_1 — 3 — 21 — 2 — 20 — 1 — 19 — A_2 —
 X (尾) — X_1 — 12 — 30 — 11 — 29 — 10 — 28 — X_2 —

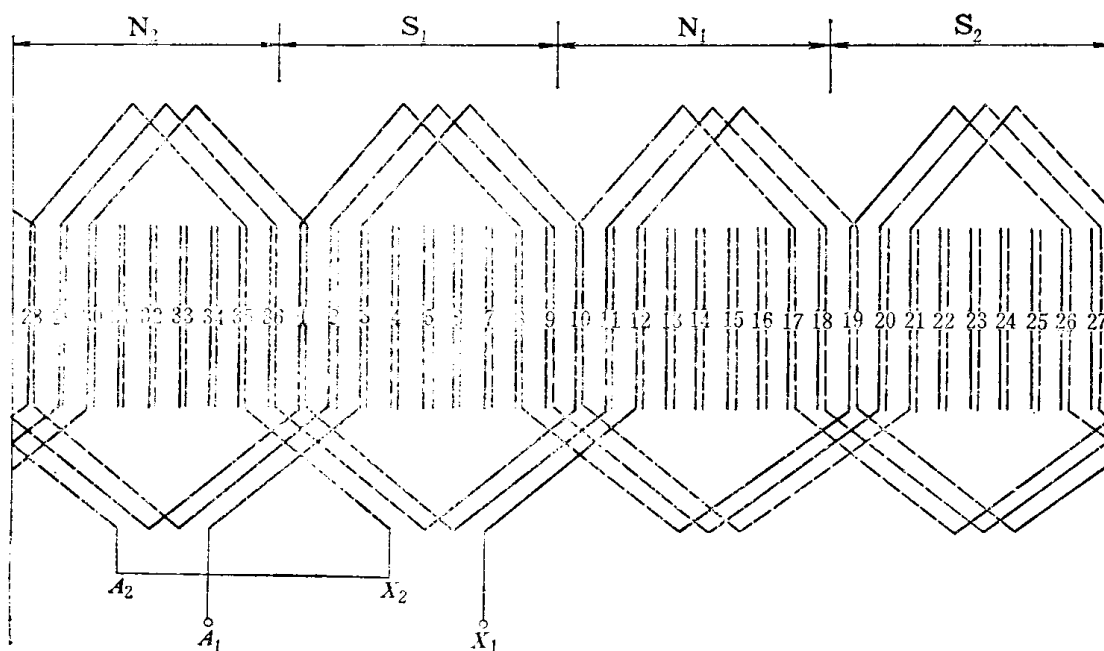


图14-7 三相双层波绕组的 A 相展开图

$$2p = 4, Z = 36, a = 1$$

从图 14-7 可见，当波绕组采用 $y = 2\tau$ 时的连接规律是：绕组沿电枢表面绕行 q 圈，把所有上层边在 S 极下属于一相的线圈按一定顺序串联起来，构成相绕组的一半，然后再沿电枢表面绕行 q 圈，把所有上层边在 N 极下属于同一相的线圈也按同样的规律串联起来，构成相绕组的另一半。这两半之间既可串联，也可并联，视所需支路数 a 而定。当串联时（如上图）则得 $a = 1$ ，如果并联（ A_1 和 X_2 连接作为头， A_2 和 X_1 连接作为尾），则得 $a = 2$ 。

在整数槽绕组中，无论是迭绕组还是波绕组，每相可能的最大并联支路数都是 $a_{max} = 2p$ 。对于迭绕组前面已作了分析，对于波绕组，为了得到最大并联支路数，必须改变图 14-7 的连接方法，不用 $y = 2\tau$ ，而用 $y = 2\tau + 1$ 槽来连接绕组，便可得到 $2p$ 条并联支路，如图 14-8 所示。图中取 $y = 2\tau + 1 = 19$ 槽， $y_1 = 9$ 槽， $y_2 = y - y_1 = 10$ 槽。对照图 14-5 a) 可见， A_1 至 A_2 、 A_3 至 A_4 、 X_3 至 X_1 、 X_4 至 X_2 四组的电势大小相等，相位相同，因此可以并联成四条支路。

波绕组的优点是可以减少线圈组之间的连接线，故多用于水轮发电机的定子绕组和异步电机的绕线式转子绕组中。波绕组的线圈一般是单匝的，此时短距不能节省端接部分用铜量，