

交流电机的 绕组理论

陈世元 黄士鹏 著

JIAO LIU DIAN JI DE
RAO ZU LI LUN



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

交流电机的 绕组理论

陈世元 黄土鹏 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书是根据作者的科研成果和教学实践并参考了一些文献编写而成的,按照作者自己的观点论述交流电机的绕组理论。本书共分六章,第一章为绪论;第二章为单速绕组;第三章为反接变极绕组;第四章为移相变极绕组;第五章为不对称绕组;第六章为特殊绕组。本书可作为高等学校电气工程等专业的教材,亦可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交流电机的绕组理论/陈世元,黄士鹏著. —北京:中国电力出版社,2007.

ISBN 978-7-5083-5695-2

I. 交... II. ①陈... ②黄... III. 交流电机—绕组 IV. TM343.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第083048号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:周娟 齐伟

责任印刷:陈焊彬

责任校对:崔燕

北京丰源印刷厂·各地新华书店经售

2007年7月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm 1/16·13印张·319千字

定价:26.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

前 言

本书根据作者的科研成果和教学实践并参考了某些文献编写而成,按照作者自己的观点论述交流电机的绕组理论。本书主要研究了反接变极绕组、移相变极绕组、波绕组、分数槽绕组、扩展相带绕组以及不对称绕组等,故本书定名为《交流电机的绕组理论》。本书由陈世元教授、黄士鹏教授合著。

本书作者多年来一直从事交流电机绕组理论的研究,在《中国电机工程学报》、《电机与控制学报》、《大电机技术》以及国际和全国的电机学术会议上发表 20 多篇关于交流电机绕组理论方面的论文。作者在进行研究中提出将反接变极绕组划分为全对称、准对称、对称化和非正规四种类型。提出各种类型绕组排列的规律性及独立排列方案个数的观点,编制了计算机排列及选择变极方案的程序。书中算例说明,用计算机往往能排列出手工排列容易疏漏的方案,而这些方案却有可能被最后选定。

陈世元教授对非正规反接变极绕组、准对称反接变极绕组、不对称绕组及波绕组进行了深入研究,提出了非正规反接变极绕组排列的轴线对称法 and 对称条件表达式、3 倍数极对数反接变极绕组的独立方案个数计算公式和方案排列的周期规律、变极绕组的节距漏抗系数计算、分析不对称绕组的磁动势分量法等。

黄士鹏教授对全对称反接变极绕组、准对称反接变极绕组、对称化反接变极绕组和移相变极绕组及波绕组进行了深入研究,提出了谐波绕组系数的周期规律、谐波比漏磁导系数计算公式、判断系数计算公式、全对称变极绕组独立方案个数计算公式、波绕组接线复杂程度的区域划分等。

本书可以作为高等院校电机及其控制专业教师和电机工程技术人员参考用书,也可作为研究生和本科生的教材,但要求不同。对研究生的要求是能够对本书的观点提出看法及评论,并能编制一个中等复杂程度的有关计算机程序;而对本科生则要求掌握公认的绕组理论,并能编制一个简单的有关计算机程序,而对本书的观点只要求作一般了解。本书作者自 1978 年开始招收电机绕组理论的研究生。1981 年起为研究生和本科生开设电机绕组理论课程。

本书是在华南理工大学各级领导的关怀下出版的,并得到华南理工大学电力学院的资助,作者在此表示衷心地感谢。

由于作者水平有限,书中难免出现错误,敬请读者指正。

作 者

主要符号表

a	并联支路数, e^{j120°
$\dot{A}$ 、 $\dot{B}$ 、 $\dot{C}$	相合成矢量
b	每极每相槽数的整数部分
c	每极每相槽数分数部分的分子
d	每极每相槽数分数部分的分母
D	定子内径
E	电动势
F 、 f	磁动势
I 、 i	电流
k_w	绕组系数
k_d	分布系数
k_p	节距系数
k_u , k_L	节距漏抗系数
k_β	节距互感系数
K	判断系数
m	相数
N	每极每相槽数假分数分子
p	极对数
Q	格数
q	每极每相槽数
r	电阻
t	单元电机数
U	电压
W	每相串联匝数
V	独立方案个数
x	电抗
y	合成节距
y_1	线圈节距, 第一节距
y_2	第二节距

Z	槽数, 阻抗
α	相邻槽矢量间电角度
α_m	相邻矢量间电角度
β	节距比
τ	极距
λ	比漏磁导
ν	谐波次数
ρ	空间初始角
φ	时间初相角
Φ	磁通
ω	角频率
ΣS	谐波漏抗系数
1、2、0	用于下标表示变极前、变极后、调制波的量
+, -, 0	用于下标表示正、负、零序分量

目 录

前言

主要符号表

第一章 绪论	1
第一节 交流绕组发展概况	1
第二节 交流绕组的构成原则与分类	2
第三节 绕组理论的研究内容	3
第四节 交流绕组的基本分析方法	5
第二章 单速绕组	14
第一节 交流绕组的构成	14
第二节 整数槽绕组	19
第三节 分数槽绕组	27
第四节 绕组参数计算	59
第五节 扩展相带绕组	70
第六节 计算机总体程序	71
第七节 小结	73
第三章 反接变极绕组	75
第一节 基本原理	75
第二节 全对称绕组	79
第三节 准对称绕组	99
第四节 对称化绕组	113
第五节 非正规绕组	122
第六节 变极绕组方案的最后选定	137
第七节 小结	140
第四章 移相变极绕组	143
第一节 移相变极绕组	143

第二节	混合变极绕组	146
第三节	多星形移相变极绕组	148
第四节	小结	164
第五章	不对称绕组的计算	165
第一节	对称绕组的不对称运行	165
第二节	不对称绕组的基本电压方程式	167
第三节	对称分量变换下的电压方程式	171
第四节	磁动势分量变换下的电压方程式	175
第五节	小结	180
第六章	特殊绕组	182
第一节	每极每相槽数 q 的分母为 3 倍数的分数槽绕组	182
第二节	三速变极绕组	189
第三节	绕线转子绕组的变极	192
参考文献		195

第一章 绪 论

绕组是电机的主要部件。在电机中，无论是把电能转化为机械能，还是把机械能转化为电能，都要通过一系列电磁过程来实现的。而这些电磁过程都必须通过绕组来实现，由感应于绕组中的电动势以及通过绕组中的电流产生电磁转矩，以传递电磁功率，从而达到机电能量转换的目的。因此，绕组有“电机心脏”之称。

要分析电机的原理和运行问题，必须先对其绕组的构成和连接规律有一个基本的了解。要设计和生产电机，必先确定绕组的形式及其参数。如果能开发出一种新型绕组，就可以使一种电机改型换代。例如，以往只生产普通的单速电机，变极绕组的研究与开发，派生出多速电机；研发了正弦绕组（即所谓的星—三角混合绕组），提高绕组利用率及削减谐波量，应用到电机上，可生产出高效率电机等。

本书只讨论交流电机上的交流绕组。

第一节 交流绕组发展概况

交流电机的交流绕组是随着工农业生产的需要而得到不断发展。最早的交流电机采用单相绕组，后来为了便于输送和分配电能而采用三相供电系统，电机便采用三相绕组。三相电动机的结构简单，工作可靠，效率较高，用铜亦较节省。三相交流绕组开始是采用集中绕组，由于冲片利用率不高，谐波分量较大，被分布绕组所取代。最早分布绕组是不分组单层绕组，分为叠式和同心式两种。为了节省端部用铜又演变成分组单层绕组，有同心式、交叉式、链式三种，而不分组绕组却很少采用。为了进一步减少谐波分量，又发展成双层绕组，主要有叠式和波式两种。双层绕组可以采用短距来削弱5、7次等相带谐波。为了兼顾单层和双层绕组的优点，又出现了单双层绕组。为了更有效地消除谐波，又出现了正弦绕组，联结方式为 $Y + \Delta$ 并联，相带为 30° 。在单速绕组中，最早为正规 120° 相带，由于存在偶次谐波现已淘汰，目前正规 60° 相带绕组应用较普遍。变极后的绕组仍然为 120° 相带或 180° 相带。单双层绕组和正弦绕组由两套绕组组成，工艺和生产管理较麻烦，而且不是在所有规格电机都实用，因此应用较少。

在多极低速同步电机(例如水轮发电机)中,为了减少空载电动势中的高次谐波(尤其是齿谐波),常常采用每极每相槽数为分数的绕组,可使电机的电磁负荷选择得比较合理,电机的电磁性能和经济性更好。此外,在系列同步电机和异步电机设计中,为了利用已有的冲模或提高冲片的通用性,也要采用每极每相槽数为分数的绕组,从而出现了分数槽绕组。

在工农业生产中常常用到多种速度,如机床、轧钢、制革、制糖、纺织等行业。以往都用机械变速设备,如果从电的方面着手来改变电机的转速,可以简化笨重的设备,因而出现了变速电机。为了提高生产效率和产品质量及节能(如电站风机等)也往往采用变速电机。此外,抽水蓄能电站用的同步发电机—电动机(水轮机—水泵)也有要求电动机的转速能够调节的,最简单有效的调速方法是在定子上采用极数可以改变的变极绕组。单绕组多速电机靠改变绕组的接法,在一套绕组中得到两种以上转速。起初,只有在倍极比(例如4/2, 8/4极等)时能用一套绕组获得两种转速。而非倍极比(例如6/4, 8/6极等)及三速以上时则需用两套绕组,这就使电机的体积较大,用材料较多,成本较高,影响多速电机的推广和应用。后来,由于生产的需要,要求非倍极比及三速以上电机也能采用单绕组,出现了“极幅调制”变极绕组。即改变每相绕组中一半线圈的电流方向来改变极数,也称为反接变极绕组,主要有全对称、准对称、对称化和非正规四种形式。这类变极绕组出线头少,但利用率低。对于某些特殊用途的电机,为了提高绕组利用率,出现了移相变极绕组,这种绕组出线头多,为了减少出线头又发展了混合变极绕组。

近年来,由于单绕组双速电机在中、大型异步电机中的推广使用,在非基本极时常常出现三相不对称分数槽绕组。在系列电机中考虑各种极数下冲片的通用性,有时亦遇到不对称分数槽绕组。此外,在设计和运行中,由于某种原因,有些电机出现空槽(或摘去某些线圈)。所有这些,都使定子三相绕组成为不对称。于是又开展了对不对称绕组的研究。此外,对波绕组如何连接能使极间连接线最短的问题也进行了研究。

虽然目前随着电力电子技术的发展,使变频调速得到广泛应用,但变极调速由于其成本很低,在只要求有极调速的地方,具有不可替代的优势。

第二节 交流绕组的构成原则与分类

一、交流绕组的构成原则

交流绕组的形式虽然各不相同,但它们的构成原则却基本相同。交流绕组

的构成主要从运行、设计和制造等方面出发来考虑，具体要求是：

(1) 在一定的导体数下，绕组的合成电动势和磁动势在波形上力求接近正弦形，在数量上力求获得较大的基波电动势和基波磁动势，即要有较大的绕组系数。尽量使谐波含量最少，幅值最小。

(2) 对于多相绕组，各相的电动势和磁动势要对称，电阻和电抗要平衡。

(3) 绕组用铜量要省，电阻要小，使得损耗小。

(4) 绕组的绝缘和机械强度要可靠，散热条件要好。

(5) 绕组的制造、安装及检修要方便。

二、交流绕组的分类

交流绕组可按相数、绕组层数、每极每相槽数、相带和绕法等分类。

(1) 从相数上看，交流绕组可分为单相绕组和多相绕组，本书主要讨论三相绕组。

(2) 根据槽内线圈的层数，交流绕组可分为单层绕组和双层绕组，还有单双层绕组。

(3) 按每极每相槽数 q 等于整数或分数，交流绕组则分为整数槽绕组和分数槽绕组。

(4) 由绕法可分叠绕组、同心绕组和波绕组。

(5) 按绕组是否可以改变极数可分为变极绕组和单速绕组。

(6) 根据相带大小有 30° 、 60° 、 120° 和 180° 相带绕组。

(7) 按每个相带线圈的端部连接方向可分为分组绕组和不分组绕组。

(8) 按多相绕组是否对称可分为对称绕组和不对称绕组。

第三节 绕组理论的研究内容

绕组理论是一门实践性很强的学科，大多数的公式都是在大量地排列和计算实际绕组方案中发现规律，通过分析和总结而推导或归纳出来的。绕组理论将指导生产实践。对绕组的研究关系到电机能否满足具体运行要求，一般分为如下几个步骤：

一、分析绕组的构成原理

根据需要，通过物理分析，数学推导，掌握并理解各类绕组的构成原理。由简单情况向复杂情况发展，如从集中绕组发展到分布绕组、双层绕组、正弦

绕组等。由特殊情况向一般情况发展，如从倍极变速绕组向非倍极变速绕组、由近极比变速绕组向远极比变速绕组发展。只有构成原理分析清楚了，绕组的排列才能付之实现，因此，这是最重要的一步。

二、研究绕组的排列方法

根据构成原理来制定绕组的排列方法，不同构成原理的绕组，有着不同的排列方法。例如，单速电机采用相带划分法，双速电机采用反接调制法，波绕组采用方格法等。近几年来，矢量图、槽号相位图也用于绕组排列。此外，又出现了对称轴线法和拓扑法等。

三、判断对称性

绕组排列完毕，要判断是否对称，一般通过矢量图来判断。也有根据排列方法，通过数学推导得出对称条件或判定公式。例如，分数槽绕组、非正规反接变极绕组等。

四、计算绕组参数

计算设计电机时所需的绕组参数，如绕组系数 k_w 、谐波漏抗系数 ΣS 、节距漏抗系数 k_d 、 k_L 等。单速电机绕组已有成型的计算公式，多速电机绕组目前采用计算机计算。此外，还要计算一些用来评价绕组方案优劣的参数，如各次谐波幅值、判断系数等。采用的工具有矢量图、磁动势图、复数解析法和计算机等。

五、评价绕组的优劣

根据各次谐波的幅值、判断系数、出线头数等参数来评价绕组的优劣，确定取舍及应用场合。

六、总结规律

通过大量方案的排列，或应用理论推导总结出绕组的各种规律，包括排列规律（变极电机独立方案数等）、参数值变化规律（谐波绕组系数周期性规律）等。必要时归纳出计算公式或表达式，上升到理论，指导生产实践，便于计算机排列。

七、编制计算机程序

根据绕组的构成原理、排列方法、对称条件、参数计算及各种规律编制出

各种绕组的计算机程序。实现计算机自动排列、计算和分析交流电机绕组。提高准确性，减轻研究人员和设计人员的劳动。

绕组理论的具体研究内容有：

(1) 单速绕组主要研究如何克服高次谐波。有两个主要措施：其一采用短距，要研究如何选择合适的节距；其二缩小相带，最早绕组为 120° 相带，目前采用的绕组是 60° 相带，近几年来又缩小到 30° 相带，即正弦绕组。正弦绕组是由两套分别接成星形联结和三角形联结的 30° 相带绕组接成 Δ 或 Y 构成。星形联结绕组与三角形联结绕组间的匝数相差 $\sqrt{3}$ 倍，要研究如何实现及应用范围的问题。

(2) 分数槽绕组要研究如何排列出对称的绕组，分析对称条件。由于出现了次谐波，谐波分量较大，还需要进行谐波分析，评价绕组方案优劣。

(3) 对于波绕组要研究如何连接能使极间连接线最短的问题。

(4) 反接变极绕组通过理论分析有全对称、准对称、对称化、非正规 4 种类型。要研究如何排列这四种类型绕组和如何处理的问题，还要研究两种或多种极的节距选择问题。由于反接变极法又叫极幅调制法。在基准极上叠一个矩形调制波，基准极有一系列谐波，调制波也含有一系列谐波，因此变极后谐波较多，也要进行谐波分析。由于变极后的绕组不再是正规 60° 相带，谐波漏抗系数 ΣS 和槽漏抗节距系数 k_u 、 k_L 要特殊计算，要研究如何计算问题。最早都是近极比，还要研究远极比变速绕组。最后还要研究方案如何选择等问题。

(5) 近年来，由于电子计算机的应用，又开展了如何用计算机进行排列各种绕组、谐波分析、参数计算、方案选择等问题的研究。

(6) 对于不对称绕组的三相电流、参数等计算问题也开展了研究。

第四节 交流绕组的基本分析方法

一、相带划分法

单速正规绕组的排列一般采用相带划分法，即把整个电机圆周的总槽数划分成若干个相带，每个相带的槽数为每极每相槽数。然后依次命名为 AZBXC Y，每对极重复一次。再按每相正负相带的电流方向和节距进行端部连接和极间连接，即构成单速绕组。对于分数槽绕组，有的相带槽数多，有的相带槽数少。至于每一个相带应占有多少个槽数要用循环序数确定。

二、合成磁动势图

合成磁动势图用来分析绕组产生的合成磁动势，它可以直观地看出波形的好坏。三相绕组的合成磁动势图包括基波和所有的谐波。一些电机制造厂家常常要求设计者把所排列绕组的合成磁动势画出。合成磁动势图是根据槽电流的分布情况，利用全电流定律把磁动势的波形曲线一次画出。

如图 1-1 所示，设 $f(x_1)$ 和 $f(x_2)$ 分别表示 $x = x_1$ 和 $x = x_2$ 处的磁压降瞬时值，其正方向用箭头表示。根据全电流定律，对虚线所示回路，忽略铁心中的磁压降，就有

$$f(x_2) - f(x_1) = \sum_{x_1}^{x_2} i_{sx} \quad (1-1)$$

式中， i_{sx} 为 x_1 到 x_2 之间的相应瞬时槽电流。

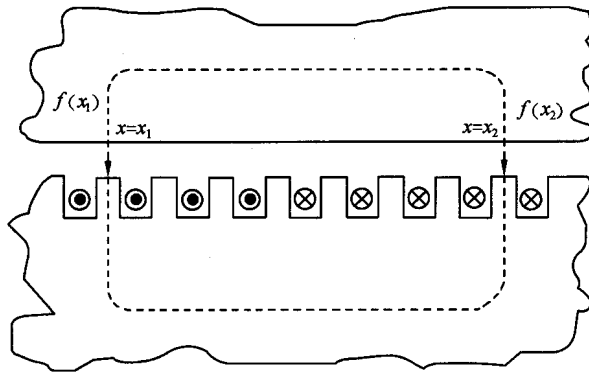


图 1-1 合成磁动势图的画法

据此可得下列作图规则：

(1) 假设某一个齿中心线处的磁压降为零，如 $x = x_1$ 处的 $f(x_1)$ 。 $x = x_2$ 处的磁压降 $f(x_2)$ 恰好等于 x_1 到 x_2 之间的相应瞬时槽电流的代数和 $\sum i_{sx}$ ，即作用于 $x = x_2$ 处的磁动势。

(2) 由零点起，每经过一个槽的中心线时，视槽内电流的大小和方向，该点的磁动势就相对于上一槽中心线的磁动势上升或下降相应的安匝数。

(3) 在两槽之间或槽电流等于零处，全电流值没有变化，磁动势曲线应画成水平。

这样就可画出电机内气隙磁动势的分布图。最后根据 N 极和 S 极下的磁通量必须相等，即在均匀气隙的情况下，磁动势曲线的正、负部分的面积相等这一原则，可确定出磁动势曲线的零线，即横坐标。

图 1-2 表示 C 相电流为零时，每极每相槽数为 2，节距为 $5/6$ 极距时三相双层整数槽绕组的合成磁动势图。可见合成磁动势图能直观地表达波形接近正弦分布的程度。

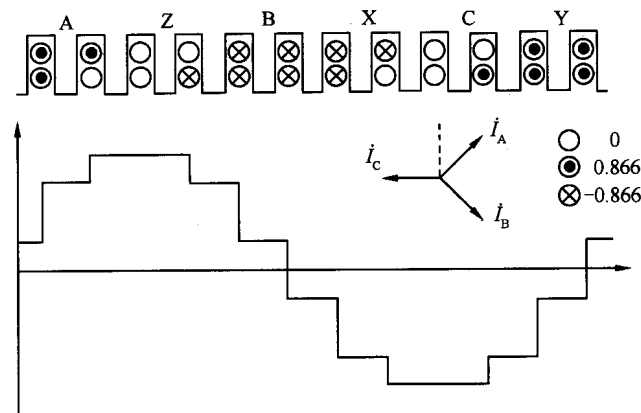


图 1-2 三相双层整数槽绕组的合成磁动势图

三、矢量图

矢量图最早是从双层绕组的电动势观点引出来的，双层绕组每槽中的上层导体代表一个线圈，以槽号表示，当这个线圈在磁场中运动切割磁力线时在线圈中产生一个电动势，可作为一个相量。相邻两槽间的电动势差一个槽的电角度。整个电机所有槽按电角度画出相量为一个星形图，叫做电动势星形图。电动势星形图最早用来计算或推导绕组系数，后来又用于划分相带，分析绕组的对称性。

当每个线圈通过电流时在线圈周围的空产生一个磁动势，也可以作为一个向量，也可画出一个星形图，称之为磁动势星形图。无论是电动势星形图还是磁动势星形图，它们对各个线圈之间的关系来讲具有同一性，统一成磁动势—电动势星形图。后来就抽象出来称为槽矢量图，成为绕组理论研究的一个有力工具。

矢量图可用来划分相带，排列绕组，分析绕组的对称性，计算绕组系数。每个相带的矢量越集中，占有的电角度越小，绕组的分布系数就越大。由于电角度随不同的谐波次数而变化，不同次谐波的相邻两槽间的矢量差也不同，因此，在计算不同的谐波绕组系数时需画出不同的槽矢量图。

【例 1-1】 一台感应电机的定子槽数 $Z = 36$ 、极数 $2p = 4$ 、相数 $m = 3$ ，试画出不同的谐波槽矢量图。

解：相邻槽的电角度为

$$\alpha = \frac{360^\circ \nu p}{Z} \quad (1-2)$$

式中， ν 为谐波次数。

基波 $\nu = 1$ $\alpha = \frac{360^\circ \times 2}{36} = 20^\circ$

3 次谐波 $\nu = 3$ $\alpha_3 = \frac{360^\circ \times 3 \times 2}{36} = 20^\circ \times 3 = 60^\circ$

ν 次谐波 $\alpha_\nu = \frac{360^\circ \nu \times 2}{36} = 20^\circ \nu$

画出槽矢量图如图 1-3 所示。

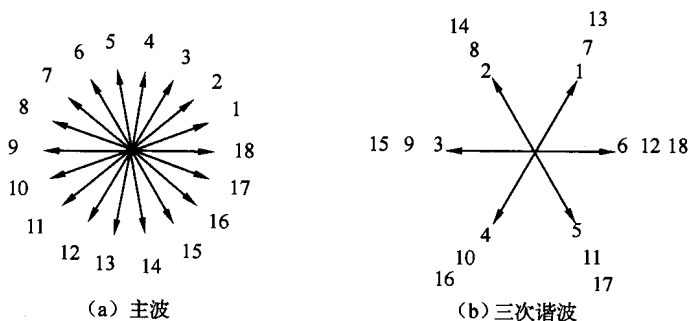


图 1-3 矢量图

四、槽号相位图

用槽矢量图分析绕组比较直观、完整地反映了矢量关系的实际情况，尤其在观察三相是否对称时，一目了然。但也存在缺点，就是画起来比较麻烦，特别是当两个相邻矢量的夹角为小数时，很难准确表达。而且矢量号码也往往互相交错，不容易发现规律性。在槽数很多的情况下，尤其突出。为弥补这个缺点，采用“槽号相位图”。现就槽号相位图的意义、画法和应用介绍如下。

1. 槽号相位图的原理

把槽矢量星形图沿圆周展开成直线，取消表示矢量的箭头，留下矢量的槽号，便得到槽号相位图。这时圆周变成一段水平线，每根矢量变成一个槽号，槽号在水平线中的位置表示矢量的相位。为了避免重叠，把同相位矢量的槽号写在不同水平线上，但位于同一垂直线上。此外，为便于应用，把负槽号（代表电流为负值的导体或线圈的矢量）也列于图中，它与同号码的正槽号隔开相当于 $\pi(\text{rad})$ 或 180° 的距离。这样就形成一个表格，表中填写 Z 个正槽号和 Z 个

负槽号。于是可画出例 1-1 的基波槽号相位图，如图 1-4 所示。

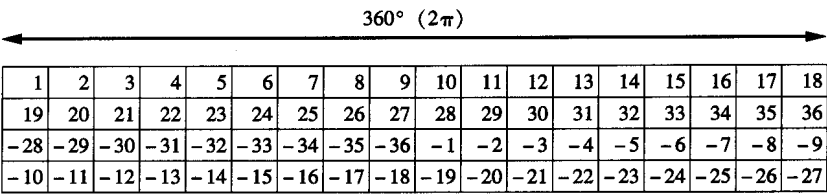


图 1-4 槽号相位图

由此可见，槽号相位图实质上就是同时画出正、负槽号矢量的槽矢量星形图，只是表示形式不同而已。相位图以表格形式出现，整个表格的水平长度相当于 $2\pi(\text{rad})$ 或 360° 。其中每个槽号代表一个矢量，同一列的所有槽号所代表的矢量都是同相位，而两个槽号之间的水平距离则代表相应两个矢量间的相位差，用弧度或角度表示。

2. 槽号相位图的画法

画槽号相位图时，首先要确定所需表格每一行的小格数，然后以某一间隔在表格里填写槽号。为求得每一行需要的最少小格数 Q ，首先计算每极每相槽数为

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{N}{d} \tag{1-3}$$

如果相邻槽号在相位图中位移 x 小格，则每对极即每一行应含的小格数为

$$Q = \frac{Z}{p}x = 2mqx = 2 \frac{mN}{d}x \tag{1-4}$$

显然 Q 必须是整数，并且为了便于填写负槽号（它比同号码的正槽号位移 180° ，即 $Q/2$ 小格），还要求 Q 是偶数。这样只要找出最小的整数 x 使式(1-4)所示的 Q 为偶数整数，问题就解决了。为此有如下两种情况：

(1) 当 d 不是 3 或 3 的倍数时（整数槽 $d=1$ ），应取 $x=d$ ，随之 $Q=6N$ 。因此，相位图每一行应有 $6N$ 个小格，而相邻槽号应位移 d 个小格。

(2) 当 d 为 3 的倍数时，可写成 $d=3d'$ ，应取 $x=d'$ ，此时 $Q=2N$ 。因此，相位图每一行应有 $2N$ 个小格，而相邻槽号应位移 $d'=d/3$ 个小格。即这时相位图每一行的小格数和相邻槽号位移的小格数都是第一种情况的三分之一。

由于每对极需要一行，正、负槽号分开填写，整个槽号相位图就共需 $2p$ 行。

对于 ν 次谐波，只需将式(1-4)中的极对数 p 换成 ν 次谐波的极对数即可。

[例 1-2] 一台三相同步电机，定子槽数 $Z=36$ ，极数 $2p=8$ 。试画出槽号