



电机学 — 旋转电机设计

〔民主德国〕 K.福格特 等著

机械工业出版社

内 容 简 介

本书为G.米勒主编的《电机学》的第三卷(第一卷:《电机基础》;第二卷:《旋转电机理论》)。书中详细介绍了电机设计的一系列问题:绕组的设计;磁路、换向、集肤效应、损耗、电感、电抗、时间常数、力和发热(包括风扇)的详细计算;直流电机、异步电机、同步电机和交流换向器电机的设计实例。特别是基于电子计算机的广泛使用,从分析到计算均侧重于现代计算方法,如磁路、集肤效应、电机优化设计等计算,分别给出了计算程序框图。

本书可供大专院校电机专业师生、从事电机的研究、设计、制造和试验工作的工程技术人员参考。

Elektrische Maschinen

Berechnung rotierender elektrischer Maschinen

K. Vogt u. a.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN 1978

* * *

电 机 学

旋 转 电 机 设 计

〔民主德国〕 K.福格特 等著

刘彦清 译

顾其善 校

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(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 787×1092¹/₁₆·印张 26¹/₄·字数 632千字

1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷

印数 0,001—3,550·定价 6.50元

*

统一书号: 15033·6249

目 录

译者的话

主要符号

第一篇 旋转电机绕组

1. 一般名称和定律	1	2.4 绕组的选择	55
1.1 电枢绕组的一般名称	1	2.4.1 计算公式	55
1.1.1 绕组各部分的名称	1	2.4.2 同步电机	56
1.1.2 绕组名称	2	2.4.3 异步电机	58
1.2 电枢绕组的一般规则	6	3. 换向器绕组	61
1.2.1 绕组元件中感应电动势向量图 的一般规则	6	3.1 绕组构成规则和绕组名称	61
1.2.2 电枢线圈构成绕组的一般规则	9	3.1.1 线圈的基本布置	61
2. 相绕组的构成	11	3.1.2 基本接线方法	63
2.1 绕组构成规则	11	3.1.3 闭路条件	65
2.1.1 相带构成规则	11	3.1.4 对称条件	67
2.1.2 对称条件	15	3.1.5 均压连接	71
2.1.3 对称的分数槽绕组	16	3.2 绕组的设计和选择	74
2.1.4 原绕组	19	3.2.1 标准绕组的设计	75
2.2 绕组的设计	21	3.2.2 特种绕组	83
2.2.1 整数槽绕组	22	3.2.3 设计公式	86
2.2.2 单层分数槽绕组	27	3.2.4 绕组的选择	87
2.2.3 双层分数槽绕组	36	4. 磁极绕组	90
2.2.4 特种绕组	39	4.1 凸极绕组	90
2.3 由槽星形图确定绕组系数	47	4.1.1 并励绕组	90
2.3.1 基本规则	47	4.1.2 串励绕组	91
2.3.2 整数槽绕组	49	4.2 分布在槽中的绕组	91
2.3.3 分数槽绕组	51	4.2.1 补偿绕组	91
		4.2.2 阻尼绕组	92

第二篇 旋转电机设计基础

5. 磁路	93	5.3 气隙磁场的磁化曲线	104
5.1 设计基础	93	5.3.1 磁极形状和磁动势分布对气 隙磁场的影响	104
5.1.1 磁场的解析处理方法	93	5.3.2 气隙分界面的间断对气隙磁场的 影响	108
5.1.2 主要计算程序	95	5.4 磁路铁磁部件的特性段	114
5.2 磁场的求解	98	5.4.1 具有近似均匀磁场的磁路分段	114
5.2.1 无载流体恒磁导率的场域	98	5.4.2 沿积分路径截面变化的磁路分段	115
5.2.2 有载流体恒磁导率的场域	101		
5.2.3 磁场的模拟解法和数值解法	102		

5.4.3 沿积分路径磁通变化的磁路分段	118	7.3.3 换向极绕组	192
5.5 磁路中各段磁场的相互影响	124	7.4 影响换向的因素	197
5.5.1 齿区磁场对气隙磁场的影响	125	7.4.1 电刷的影响	197
5.5.2 并列磁路分段的磁化特性	127	7.4.2 绕组设计和换向极结构的影响	199
5.5.3 轭部磁场对气隙磁场的影响	129	8. 电流集肤效应	201
5.6 空载特性曲线的确定	132	8.1 电流集肤效应的基本关系	201
5.6.1 集中(励磁)绕组的直流励磁	133	8.1.1 基本关系的确定	201
5.6.2 分布(励磁)绕组的直流励磁	135	8.1.2 绕组设计观点	203
5.6.3 多相交流励磁	139	8.2 电流集肤效应的分层计算	204
5.6.4 特殊励磁方式	143	8.2.1 单边电流集肤效应	204
5.7 负载电流对励磁绕组磁场的影响	146	8.2.2 双边电流集肤效应	207
5.7.1 电枢磁动势为线性分布的电机	146	8.2.3 参数的定义	210
5.7.2 正弦分布电枢磁动势和均匀气隙电机	149	8.3 电流集肤效应的严密解析计算	213
5.7.3 正弦形分布电枢磁动势和不均匀气隙的电机	153	8.3.1 基本公式	213
6. 漏磁	157	8.3.2 实心导体	215
6.1 漏磁场的划分	157	8.3.3 分层导体	221
6.1.1 部分漏磁场的定义	157	8.3.4 编织线棒	225
6.1.2 解析表达式	159	8.3.5 换向器绕组	226
6.2 漏磁的计算基础	162	9. 损耗	228
6.2.1 漏磁通的基本计算	162	9.1 电路中损耗	228
6.2.2 漏磁链的基本计算	163	9.1.1 绕组电阻	228
6.3 漏磁通的计算	165	9.1.2 绕组中的损耗	230
6.3.1 槽-齿顶漏磁通	166	9.1.3 电刷接触损耗	230
6.3.2 凸极漏磁通	167	9.2 磁路中的损耗	230
6.4 漏磁链的计算	168	9.2.1 反复磁化损耗	231
6.4.1 槽和齿顶漏磁	168	9.2.2 气隙磁场中的高次谐波产生的损耗	235
6.4.2 绕组端部漏磁	174	9.3 机械损耗	239
6.4.3 高次谐波漏磁	176	9.3.1 气体摩擦和轴承摩擦产生的损耗	239
6.4.4 磁极漏磁	178	9.3.2 电刷摩擦损耗	240
7. 换向	179	9.4 效率	240
7.1 换向过程	179	10. 力	242
7.1.1 基本换向过程	179	10.1 求解力的基本关系式	242
7.1.2 电刷接触负荷	181	10.1.1 由场量求解作用在载流体上的力	242
7.2 换向的基本解析方法	182	10.1.2 由场量求解交界面上的力	243
7.2.1 网络方程	182	10.1.3 由电感的变化求解力	245
7.2.2 换向区域	183	10.2 作用在嵌入槽中导体上的力	246
7.2.3 网络方程的求解	185	10.2.1 切向力	246
7.3 换向的实用计算	187	10.2.2 径向力	247
7.3.1 电枢电抗电动势曲线	187	10.3 作用在叠片铁心上的径向力	250
7.3.2 电枢平均电抗电动势	190	10.3.1 一般现象	250

10.3.2	基波磁场的作用	250	11.3.2	无旋平面绝对气流表达式的解法	298
10.3.3	磁拉力	252	11.3.3	设计参数的确定	309
10.3.4	由旋转磁场及其(反)作用合成的旋转力波	255	11.3.4	风扇中的气流损耗	310
10.4	作用在转子上的轴向力	260	12.	电感和电抗	312
10.4.1	一般现象	260	12.1	主电感	312
10.4.2	气隙磁场产生的轴向力	261	12.1.1	励磁绕组的主电感	313
10.4.3	绕组端部漏磁场产生的轴向力	266	12.1.2	相绕组的主电感	313
10.5	作用在绕组端部导体上的力	266	12.1.3	相绕组的主电抗	315
10.5.1	一般现象和关系式	266	12.1.4	换向器绕组的主电感	317
10.5.2	等长平行导体间的力	270	12.1.5	考虑饱和影响	317
10.5.3	双层绕组上下层导体间的力	271	12.2	漏电感和漏电抗	318
10.5.4	作用在绕组端部支架上的合力	272	12.2.1	相绕组的漏电感和漏电抗	318
11.	散热	274	12.2.2	励磁绕组的漏电感	319
11.1	基本方程	274	12.3	特征电感和电抗	319
11.1.1	热量的传递	274	12.3.1	同步电机的电感和电抗	319
11.1.2	冷却介质的运动	275	12.3.2	异步电机的电感和电抗	323
11.1.3	边界条件	276	13.	时间常数	325
11.1.4	简化的热传导微分方程	277	13.1	固有时间常数	325
11.1.5	相似理论	280	13.1.1	绕组的固有时间常数	325
11.1.6	流动介质的特性	281	13.1.2	铁磁路实心段的固有时间常数	326
11.2	冷却过程的工程计算	283	13.1.3	转子时间常数	326
11.2.1	流体的无源元件(通风沟)	283	13.2	特征时间常数	327
11.2.2	热传递	286	13.2.1	两个相互交链绕组的时间常数	327
11.2.3	等效热路图	288	13.2.2	同步电机的时间常数	328
11.3	流体力学中的有源元件(风扇)	292	13.2.3	异步电机的时间常数	329
11.3.1	风扇中气流的基本表达式	292			

第三篇 旋转电机设计

14.	基本设计过程	331	15.	考虑附加条件的设计	344
14.1	设计公式	332	15.1	可纳入设计公式中的附加条件	344
14.1.1	设计公式的推导	332	15.1.1	机械约束条件	344
14.1.2	主要设计值	337	15.1.2	电气约束条件	344
14.1.3	主要尺寸的求解	337	15.2	不可纳入设计公式的附加条件	346
14.2	设计适用值	339	15.2.1	规定的运行性能	346
14.2.1	几何尺寸适用值	339	15.2.2	优化设计	347
14.2.2	电磁负荷适用值	341	15.2.3	借助电子计算机实现优化	349

第四篇 主要类型旋转电机的设计和计算过程

16.	直流电机	353	16.1.2	电枢绕组的设计	354
16.1	设计和计算过程	353	16.1.3	换向器设计	355
16.1.1	主要尺寸的确定	354	16.1.4	磁路设计	356

16.1.5 验算	356	18.1.3 磁路设计	384
16.2 算例	356	18.1.4 验算	385
16.2.1 设计	357	18.2 算例	385
16.2.2 验算	361	18.2.1 设计	385
16.2.3 其它结构型式电机的设计参数	367	18.2.2 验算	389
17. 异步电机	369	18.2.3 其它结构型式电机的设计参数	397
17.1 设计和计算过程	369	19. 交流换向器电机	398
17.1.1 主要尺寸的确定	369	19.1 交流并励换向器电机的设计和计算过程的评述	398
17.1.2 绕组设计	370	19.1.1 设计	398
17.1.3 磁路设计	371	19.1.2 验算	399
17.1.4 验算	372	19.2 一台转子供电的交流并励换向器电机算例	399
17.2 算例	373	19.2.1 参数和尺寸	400
17.2.1 设计	373	19.2.2 绕组	400
17.2.2 验算	376	附录 磁化曲线	402
17.2.3 其它结构型式电机的设计参数	382	参考文献	403
18. 同步电机	383		
18.1 设计和计算过程	383		
18.1.1 主要尺寸的确定	383		
18.1.2 电枢绕组设计	384		

第一篇 旋转电机绕组

1. 一般名称和定律

电机的基本作用原理是以磁场和绕组的相互作用为基础的。其中绕组的布置、接线及其线端的电气参数基本上决定了电机的运行状况，并由此确定了电机的类型。根据绕组在电机作用机理上能承担的任务，把绕组分为：电枢绕组、励磁绕组、补偿绕组和阻尼绕组。

电枢绕组系指内部感生能量所需电动势的绕组。励磁绕组能建立能量转换所需的磁场，但异步电机却是通过电枢绕组的励磁建立磁场的。励磁绕组通常不参与能量转换。补偿绕组是对电机运行性能产生影响的辅助磁场绕组。也可以把换向极绕组视为补偿绕组。补偿绕组也不参与能量转换。同步电机的阻尼绕组装在一个特殊位置上。主要用来阻止不希望的附加效应、逆序磁场和振荡。而在异步电机中，阻尼绕组和电枢绕组的作用相同。

考虑到几何结构和内部接线，把最主要的绕组分成相绕组、换向器绕组和凸极绕组。

将分布在槽中的单个线圈连接成单相或多相绕组组成了所谓的交流电枢绕组。但在隐极同步电机中也用它作励磁绕组。换向器绕组是把排列在槽中的单个线圈连接成一个或几个闭合回路，并与换向器相连接。换向器绕组作为电枢绕组的一部分，它不仅用在直流电机中，而且也用于交流换向器电机。凸极绕组通常制成集中励磁绕组。

1.1 电枢绕组的一般名称

在《旋转电机理论》(Th)第6章已介绍了绕组的最主要名称。对复杂绕组的处理，还需以新名称完善和补充一部分内容。为完整起见，下一节将重复说明已提及的名称。

1.1.1 绕组各部分的名称

绕组的基本单元是线圈。线圈由一些集中排列和串联连接的线匝组成。因为在一个线圈内没有结点，所以线圈中的所有线匝流有相同的电流。

电枢绕组的每个线圈嵌在电枢的两个槽中。在两个槽中嵌放的线圈，直线部分称线圈边，两个线圈边之间的连接部分称线圈端部、绕组端部或端部连接线。两个线圈边之间的距离（沿电枢表面测量）称线圈节距（图1.1）。

位于线圈平面上的对称轴把该线圈分成两个半线圈，或把每圈线匝分成两个半线匝或两根导体。假如线圈只由一匝构成，则可把半线匝称为导条。

若一个槽中有几个线圈边，常将线圈边叠放成两层，也有极少数叠放成两层以上。在各层中也可以并列放置几个线圈边。因为各线圈的端部本身就是交叉的（图1.1），所以必须把线圈端部弯转到几个彼此相邻的平面或层上去（见图1.3）。

借助于连接线把各线圈连接成绕组。所有属于单相系统或多相系统中同一相的线圈构成

一个相。每相绕组可以由串联线圈的几个并联连接的支路组成。在特殊情况下，也存在部分并联连接的〔第1册第Ⅲ章〕。

用线圈组来表示一相中所有直接并布置的线圈。线圈组的所有线圈常常直接串联连接。每极每相的线圈边在电枢周边占据的部位称几何相带。

首先仅就单一绕组各部分进行命名。本节不作详细说明，将在下节阐明。

1.1.2 绕组名称

线圈节距、线圈匝数、层数、线圈端部平面数、线圈端部的形状和位置、端部连接线以及线圈的制造方式为整个电枢绕组的一般名称。此外，对于相绕组和换向器绕组还有专门的绕组名称，在阐述这种类型绕组时再介绍它的名称。

假如一套绕组的线圈节距 W 等于极距 τ_p ，则称其为全节距绕组或直径绕组，这是因为在一个两极电枢上的线圈端部成为一条直径（图 1.2 a）。短距绕组（或弦绕组），线圈节距小于（或大于）极距，而且在两极电枢上线圈端部成为一条弦（图 1.2 b）。

框形绕组由匝数为 w_p （1匝以上）的线圈组成。假如一套绕组的每个线圈都由1匝组成，就称为棒形绕组（见图1.6）。根据层数可分为单层绕组和双层绕组（图1.3）。多于两层的绕组是罕见的。

根据制造方法可分为成型框形绕组或镶嵌绕组、散嵌绕组、穿入式绕组或牵入式绕组和半成型框形绕组。

成型框形绕组是把已制成且完全绝缘的线圈嵌入电机的开口槽中（图1.4 a）。散嵌绕组是把初步成型线圈的单根导线“散嵌”在绝缘好的半开口槽中构成的（图1.4 b）。散嵌

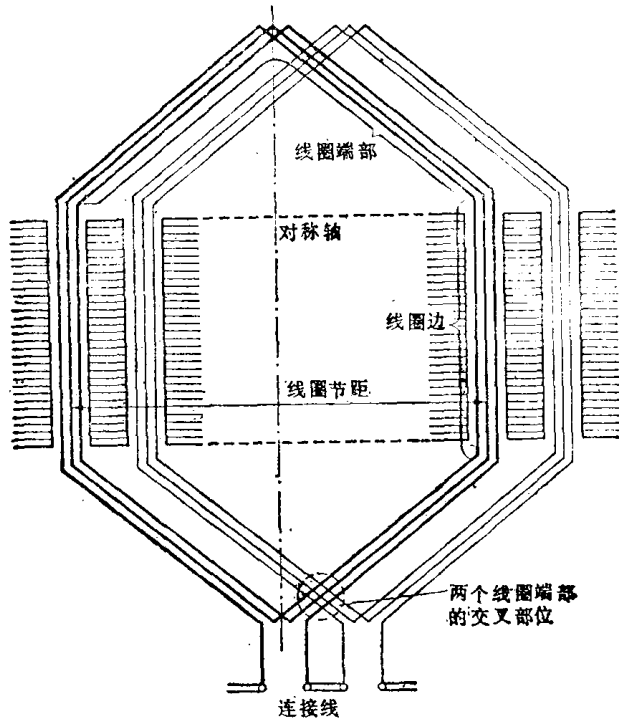


图1.1 绕组各部分名称

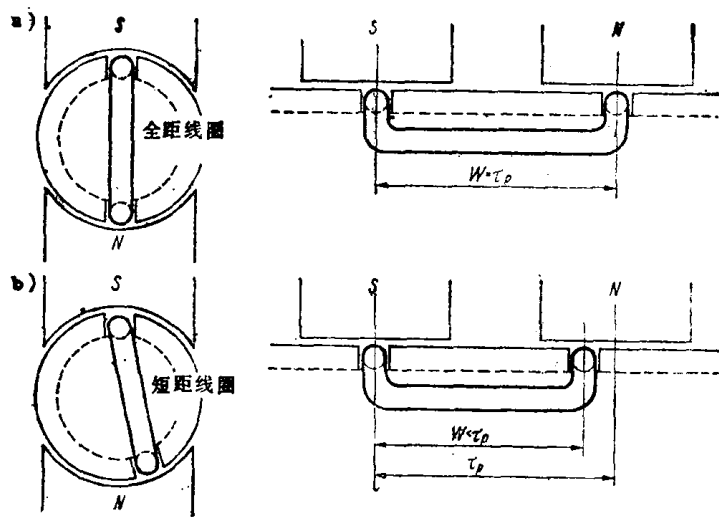


图1.2 根据线圈节距命名的电枢绕组
a) 全距绕组 ($W = \tau_p$) b) 短距绕组 ($W < \tau_p$)

电机学

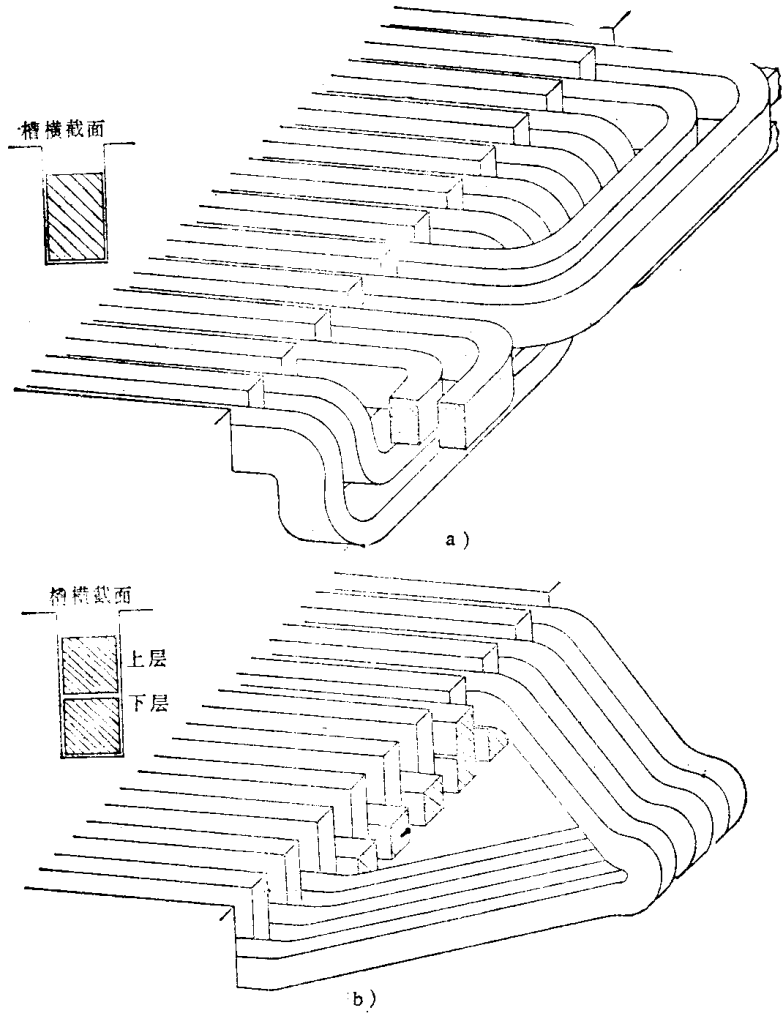


图1.3 根据层数命名的电枢绕组
a) 单层绕组 b) 双层绕组

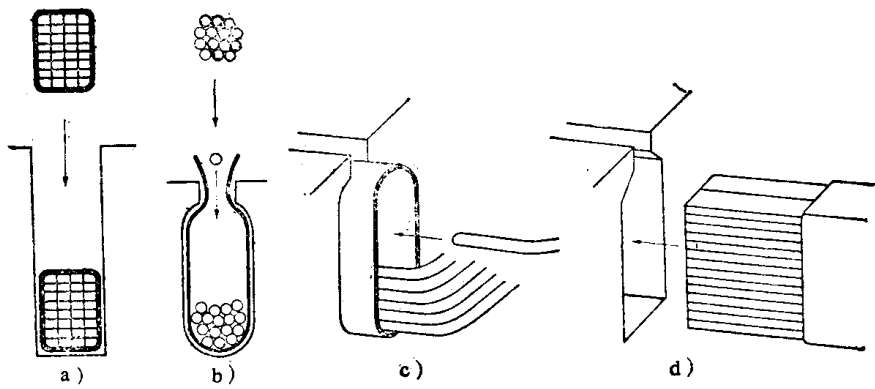


图1.4 根据制造方式命名的电枢绕组
a) 成型圆形绕组或镶嵌绕组 b) 散嵌绕组 c) 穿入或牵入绕组 d) 半成型圆形绕组

后，将线圈整形，并把槽绝缘包封在线圈边上。假如槽绝缘是用封闭的绝缘套筒构成，则必须“穿入”单根导线。这时就构成一个穿入式绕组或牵入式绕组（图 1.4 c）。这种绕组的制造很费时间，越来越被其它类型的绕组所取代。对于少见的半成型圆形绕组是把半成型的

二

线圈、半线圈或通常绝缘好的线棒插入多半是半开口槽中（图 1.4 d）。这时，仅在线圈的一端加工成型。线圈的另一端

（第二端）（它在半成形线圈中是分开的）插入后再成型和连接。棒形绕组线圈的第二端在插入后常常整形成渐开线形端部连接。按照线圈的成型形状或线圈端部划分，可分为矩形框形绕组（图 1.3 a、2.8 b、2.8 c 和 2.8 d）、梯形框形绕组（图 2.8 e）和具有渐开线端部的渐开线框形绕组（图 1.5）。矩形框形绕组和梯形框形绕组几乎只制成单层绕组。在梯形框形绕组中，线圈组（有时也是单个线圈）的形状相同。后者可构成一套具有等节距框形绕组。双层绕组通常由相应于图 1.3 b 的成型线圈制成。这种双层成型线圈有时也被用作大型电机的单层绕组。双层成型线圈的节距都相等。因为这种绕组的线圈端部构成篮形，所以也称为篮形绕组（见图 1.1、1.3 和 2.13）。

假如把一套篮形绕组或渐开线绕组的端部连接线连接成在相同的极对下的线圈串联连接，则将形成一个环形的绕线方向。把这种绕组称为叠绕组（图 1.6 a 和 b）。假如把相邻极对下的线圈串联起来，则形成一套波形绕组，故称为波绕组（图 1.6 c 和 d）。对于棒形绕组，因其形状特殊，很容易识别（图 1.6 c）。

根据矩形框形绕组端部构成的平面数，可分为两平面绕组或两层绕组和三平面绕组或三层绕组（图 1.7，图 1.3 a）。所有其它形状线圈的端部均位于两个平面内。假如一套篮形绕组的线圈端部排列成圆筒形（这种情况出现在极对数多的定子绕组和转子绕组中），则称为套筒形绕组或圆筒形绕组（图 1.8 a）。假如这种绕组排列成圆锥形，则称为圆锥形套筒绕组或渐开线绕组（图 1.8 b）。渐开线绕组的线圈端部也可以位于一个与端面平行的平面中，

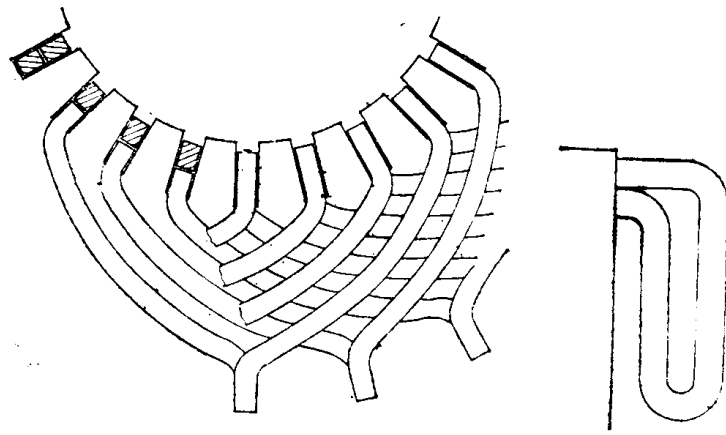


图 1.5 根据线圈端部形状命名的电枢绕组——渐开线绕组

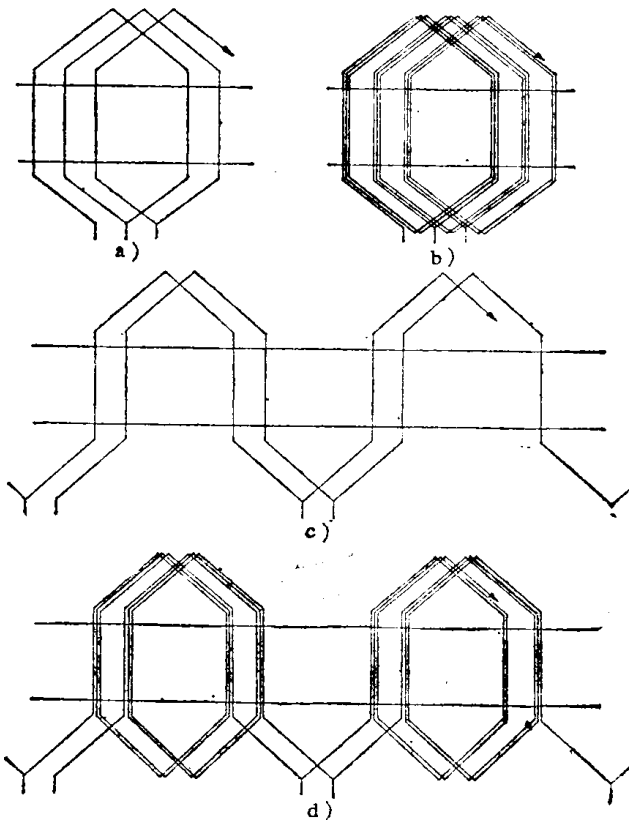


图 1.6 根据线圈匝数和端部连接线的布置命名的电枢绕组
a) 棒形叠绕组 b) 框形叠绕组 c) 棒形波绕组 d) 框形波绕组

对于棒形绕组，因其形状特殊，很容易识别（图 1.6 c）。

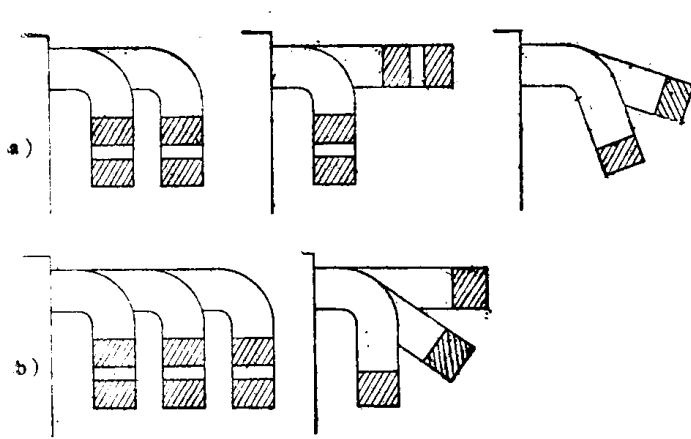


图1.7 根据线圈端部平面数命名的电枢绕组

a) 两平面或两层绕组 b) 三平面或三层绕组 a) 套筒形或圆筒形绕组 b) 圆锥套筒形绕组 c) 端面绕组

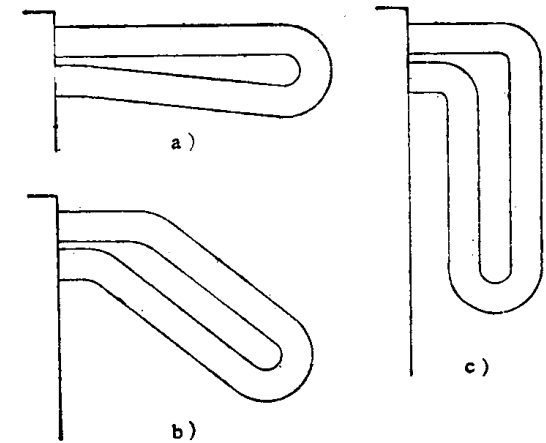


图1.8 根据线圈端部形状命名的电枢绕组

故也称为端面绕组 (图 1.5 和 1.8 c)。在绕组端部的侧视图中, 通常忽略电枢表面的曲率。

表 1.1 概括示出了电枢绕组的绕组名称、特征标记和特征参数或结构。

表1.1 电枢绕组的一般名称

特 征	标 记 符 号	名 称	
线圈节距	$W = \tau_p$ $W (\leq) \tau_p$	全距绕组 (或直径绕组) 短矩绕组 (或弦绕组)	
线圈匝数	$w_{s,p} > 1$ $w_{s,p} = 1$	框形绕组 棒形绕组	
层数	1 层 2 层	单层绕组 双层绕组	
制造方式	嵌装成型线圈 散嵌单根导线 穿入单根导线 插入半成型线圈	成型框形绕组或嵌装绕组 散嵌绕组 穿入或牵入绕组 半成型框形绕组	
线圈及其端部形状	矩形 梯形 渐开线形线圈端部 图1.3 b 中的成形线圈	矩形框形绕组 梯形框形绕组 渐开线绕组 篮形绕组	
连接线的连接方式	连接到起始极对下的线圈上 连接到下一极对下的线圈上	叠绕组 波绕组	
矩形框形绕组的线圈端部平面数	2 平面 3 平面	两平面或两层绕组 三平面或三层绕组	
篮形或渐开线绕组的线圈端部形状	圆形套筒	套筒或圆筒形绕组	
	锥形套筒	圆锥套筒绕组	渐开线绕组
	端面	端面绕组	绕组

1.2 电枢绕组的一般规则

绕组的基本元件为线圈。若线圈与气隙磁场的磁通交链仅仅是由于线圈和磁场间相对运动起的作用，则根据《旋转电机理论》8.1.4节得知，在两个线圈边上有感应电动势。根据《旋转电机理论》8.1.1节在线圈边上可得到与气隙磁通密度成正比的线圈边虚构的电动势。通常整个电枢绕组所有线圈的匝数都相同。这样，一个槽的所有线圈边的电动势大小相等，而且它可以满足每槽线圈边电动势（即所谓槽电动势）的另一种处理方法。首先各相的线圈边分布和线圈边中感应的槽电动势，对于电枢绕组的设计和评定是很重要的，而线圈的结构则是次要的。因此，线圈边就成了电枢绕组设计的要素。

1.2.1 绕组元件中感应电动势向量图的一般规则

假如使一个旋转磁场通过电枢绕组，则槽电动势就成为正弦形交变电动势。由于槽是均匀分布的，它的向量构成一个径向对称的向量星形图，简称为槽星形图。最简单绕组的槽星形图已在《旋转电机理论》8.1.4节中介绍。首先应分析基波旋转磁场产生的槽星形图的一般规律。然后把这个规律应用到相应谐波的槽星形图中。

a) 每对极的槽数为整数。当每对极的槽数为整数时，则在所有 p 对极的旋转磁场中槽的分布都相同，这样，所有 p 对极的槽星形图也相同。因此，求解一对极的槽星形图已足够。所以把总槽数 N 分配到每对极上，即在磁场的的一个周期上有 N/p 个槽距（图 1.9 a）。因为磁场的的一个周期相当于 2π 或 360° 槽电动势相位角，所以对于两个相邻槽的槽电动势之间的相位移（即两槽电动势向量间夹角）为所谓的槽距角

$$\alpha_n = \frac{360^\circ}{N} p \quad (1.1)$$

在槽星形图 1.9 b 中，从一个向量到相邻向量的位移角均为 α_n 。假如把槽和向量编号，那么向量 $N/p + 1$ 又会重复第 1 个向量的向位，而且槽星形图重复第二对极的各向量。如果把重复表示出来，就必须画出向量 N/p 的第二个圆。

因此，当 $N/p =$ 整数时，对于某一极对数 p 可得到一个具有 p 个圆的槽星形图。这时，槽星形图有 $N' = N/p$ 条射线。每条射线由同相位的 p 个槽电动势向量构成。

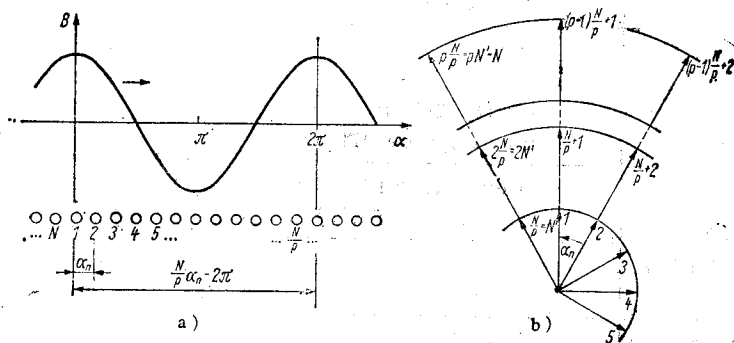


图1.9 $N/p \in G_n$ 时槽星形图的构成

a) 基波磁场和槽的分布 b) 槽星形图

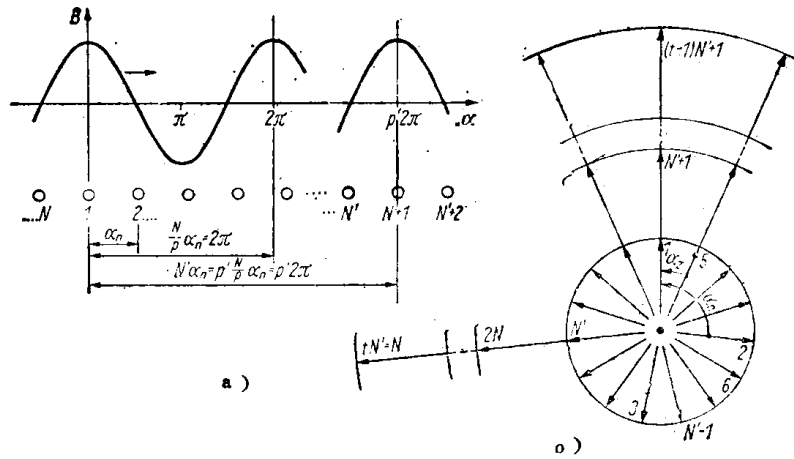


图1.10 $N/p \in G_n$ 时槽星形图的构成

a) 基波磁场和槽的分布 b) 槽星形图

b) 每对极的槽数不是整数。在槽距为 N/p 的情况下，从表面看分配到一对极（即磁场的一个周期）上，因此，式 (1.1) 仍适用。但从第一个槽转过 2π 角度（即气隙磁场经过一个周期）时却没有落在槽上（图 1.10 a）。

因此，对于第二对极则得到相对于气隙磁场的另一个槽的分布和另一个槽星形图。在一般情况下，相对于气隙磁场的槽分布只按极对数 p' 重复出现（图 1.10 a），而且必须存在具有不同相位的槽电动势向量的 $N' = p'N/p$ 个槽。假如 $N > N'$ 或 $p > p'$ ，则槽 $N'+1, 2N'+1, \dots, (t-1)N'+1$ 的电动势向量与起始槽 1 的电动势同相。以这些向量开头的总有 N' 个不同相位电动势重复的槽星形图，即有一个新的槽星形圆图。把槽号填到槽星形图的向量上时，必须在每个圆上填 p' 次。形成一个有 t 个圆和 N' 条射线的槽星形图，这些射线都是由 t 个同相位的电动势向量组成（图 1.10 b）。

如此，每台电机有 t 个电气上等效的槽分布，其中包括 $N' = N/t$ 个槽和 $p' = p/t$ 对极。为了确定 t ，必须找出 N' 和 p' 的最小可能的整数（往往使槽分布在 N' 内重复）。由此得到 t 为 N 和 p 的最大公约数。

$N/p \in G_n$ 时 (a 节)， $t = p$ ，因而 $N' = N/p$ 和 $p' = p/p = 1$ 。因此，表 1.2 中列出的槽星形图的参数也适用于这种情况。

假如槽星形图有 $N' = N/t$ 条射线，则相邻射线或相邻向量间的相位角为

表1.2 槽星形图的参数

t	N 和 p 的最大公约数
$N' = N/t$	槽星形图的射线数
t	一条射线的向量数 = 槽星形圆图数
$p' = p/t$	一个槽星形圆图上的槽号的填写次数
$p/t - 1$	编号时逾越向量数

$$\alpha_z = \frac{360^\circ}{N} t \tag{1.2}$$

称 α_z 为向位角。与式 (1.1) 相比，槽距角可以表示为向位角的倍数

$$\alpha_n = \frac{p}{t} \alpha_z = p' \alpha_z \tag{1.3}$$

当 $p = t$ 时, $\alpha_n = \alpha_z$, 且向量的槽号是连续的。假如 $p > t$, 则 $\alpha_n > \alpha_z$, 而且槽号总是越过 $(p/t) - 1$ 个向量, 即在向量编号时, 在槽星形图每个圆上都必须填写 p/t 次。

根据《旋转电机理论》8.1.4 节, 由旋转磁场的 ν 次谐波感应的槽电动势的槽距角为 $\nu\alpha_n$ 。同样, 相位角为 $\nu\alpha_z$ 。因此, 第 ν 次谐波与基波的槽星形图的差别在于只出现 ν 倍角。

c) 示例 对于 $N/p \notin G_n$ 和 $N/p \in G_n$ 的情况, 各以一个例子来说明所讨论的关系。为清楚起见, 选择电机正常用的较少槽数。然而, 仍可识别出各类槽星形图的特征。

例 1: $N = 27, p = 3, N/p = 9 \in G_n, t = p = 3, N' = 9, p' = 1, \alpha_n = \alpha_z = 40^\circ$

槽星形图有 9 条射线, 每条射线有三个向量。因为 $\alpha_n = \alpha_z$, 所以得到连续的向量号 (图 1.11 a)。

例 2: $N = 30, p = 4, N/p = 7.5 \notin G_n, t = 2 \neq p, N' = 15, p' = 2,$

$$\alpha_n = 2\alpha_z = 2 \times 24^\circ = 48^\circ, (p/t) - 1 = 1$$

槽星形图有 15 条射线, 每条射线有两个向量。由于 $\alpha_n = 2\alpha_z$, 在向量编号时, 总是超过一个向量 $[(p/t) - 1 = 1]$ 。按每个圆绕两圈 $[p/t = p' = 2]$ 来编一个圆的所有向量号 (图 1.11 b)。

d) 槽星形图的应用。1.2 节引言中已有介绍, 第 2、第 3 节将要阐述, 线圈边是绕组设计的要素。在设计一套相绕组时, 第 1 步是把线圈边分配到各相中去。因为线圈边中的电动势是通过槽电动势向量表示的, 所以, 在大多数情况下, 可以通过对槽电动势向量的分配来分布线圈边。因此, 可借助槽星形图进行绕组设计。

旋转磁场在一个线圈、一个线圈组或一相中感生的电动势, 可以通过相应槽电动势相量的图解加法求得 (参见《旋转电机理论》8.1.4 节)。因此, 可以把槽星形图扩展到线圈电动势向量图, 即所谓线圈电动势星形图, 以确定绕组系数、评价多相绕组的对称性和研究并联连接各部分绕组的方法。

换向器绕组是一套或几套本身闭路的电枢绕组。因此, 把槽电动势向量相加就得到一个或几个闭合多边形。该多边形可以有一个或几个循环组。称这种多边形为电动势多边形。可用来评价换向器绕组的对称性。这时, 取一个假想的旋转磁场已足够。

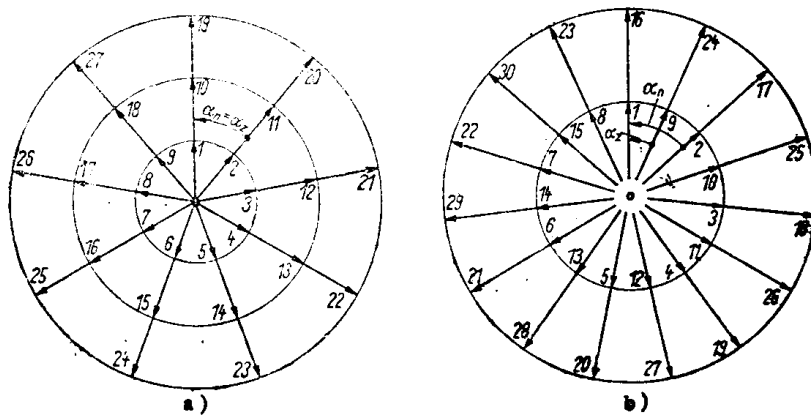


图 1.11 槽星形图示例

a) $N = 27, p = 3, t = 3, N' = 9, p' = 1, \alpha_n = \alpha_z = 40^\circ$ b) $N = 30, p = 4,$
 $t = 2, N' = 15, p' = 2, \alpha_n = 2\alpha_z = 48^\circ$

1.2.2 电枢线圈构成绕组的一般规则

按照《旋转电机理论》8.1.4节，根据图1.12所假定的方向，由基波旋转磁场在一个线圈中感应的电动势 $e_{s,p} = e_{ab}$ 和假定的槽电动势 e_{na} 或 e_{nb} 有如下关系

$$e_{s,p} = e_{ab} = -e_{na} + e_{nb} \quad (1.4)$$

当向量 e_{na} 和 e_{nb} 反相时，线圈产生最大基波电动势。公式

$$e_n \sim B = \hat{B} \cos(\alpha - \alpha_1) = \hat{B} \cos \frac{\pi}{\tau_p} (x - x_1)$$

(图1.12) 适用于相对坐标 α ，它相当于槽电动势的相位移角

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau_p} x = \frac{x}{\tau_p} 180^\circ \quad (1.5)$$

线圈边间距离 $x = \tau_p$ 时，即线圈节距 $W = \tau_p$ 时，代入 $\alpha = \pi$ ，两个槽电动势向量相位相反。全节距线圈产生最大基波电动势。

根据通用的绕组构成规则，全节距线圈结构不总是可行的，而且鉴于磁场谐波的产生（见《旋转电机理论》7.4.4节）以及对磁场谐波的作用（见《旋转电机理论》8.1.1节），这种结构通常也不受欢迎。因此，通常制造 $W \leq \tau_p$ 的短距线圈。选择 W 大于 τ_p 还是小于 τ_p ，对线圈的电磁性能无关紧要。可是为了缩短线圈端部，即减少导线材料用量，实践中总是选择 $W \leq \tau_p$ 。如果线圈节距用槽距表示

$$\tau_n = \frac{D\pi}{N} \quad (1.6)$$

即把槽距作为线圈节距的度量单位，则可得到所谓绕组节距或槽节距（见《旋转电机理论》第6.1.1节）

$$y_n = \frac{W}{\tau_n} = \frac{\tau_p - x_v}{\tau_n} = \frac{N}{2p} - y_v = y_c - y_v \approx \frac{N}{2p} \quad (1.7)$$

式(1.7)中， x_v 表示线圈的缩短量（见图1.12）， y_v 表示线圈的槽节距缩短量和 $y_c = N/2p$ 表示全节距。用下式表示极距

$$\tau_p = \frac{D\pi}{2p} \quad (1.8)$$

槽节距等于一个线圈从左线圈边到右线圈边所经过的槽距数。

考虑到式(1.1)、(1.6)、(1.7)和(1.8)，由式(1.5)可得用于相关坐标的线圈节距

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W}{\tau_p} 180^\circ = y_n \frac{\tau_n}{\tau_p} 180^\circ \\ &= y_n \frac{2p}{N} 180^\circ = y_n \alpha_n \\ &= (y_c - y_v) \alpha_n \\ &= 180^\circ - \eta_v \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中， $\eta_v = y_v \alpha_n$ 为节距缩短角。

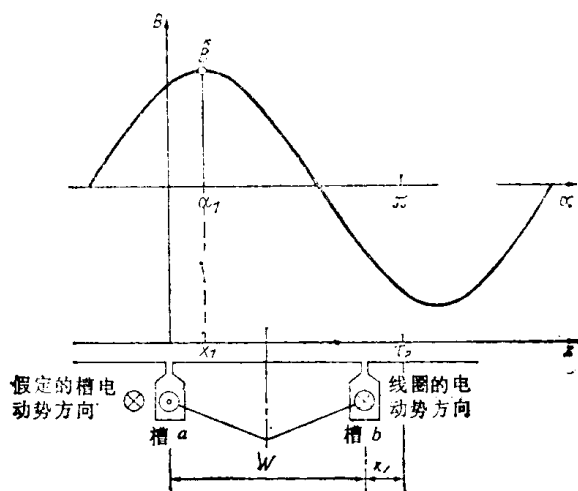


图1.12 一个线圈的电动势方向

假设 z_p 为电枢总导体数、 w_p 为电枢总匝数、 k 为电枢总线圈数，则可得到线圈匝数

$$w_p = \frac{w_a}{k} = \frac{z_p}{2k} \quad (1.10)$$

此外，分布在一个槽中的线圈边数 u 是广义的。因为线圈数为线圈边数的一半，故 u 也是分布在一个槽中线圈边数的一半，或者为一个槽中双层绕组每层的线圈边数

$$u = \frac{k}{N} \quad (1.11)$$

该参数采用后面的定义比较明了。对于构成相的绕组，在每槽每层中只放一个线圈边。因此，单层绕组 $u = \frac{1}{2}$ ，双层绕组 $u = 1$ 。双层绕组的线圈数是相同槽数单层绕组线圈数的 2 倍。换向器绕组通常制成双层，这时，在每槽每层中常放置一个以上的线圈边。因而，对于换向器绕组， u 的数目很重要。超过两层的换向器绕组只在特殊情况下出现。

2. 相绕组的构成

如第1章所述，构成相的绕组（以下简称相绕组）主要是交流电机的电枢绕组。因此也称为交流电枢绕组。但也可以把嵌于槽中的直流供电的隐极同步电机励磁绕组视为相绕组，这将在第4章介绍。

根据“构成相绕组”的名称，可以把该绕组的各个线圈在构成线圈组的情况下连接成绕组各相。在线圈组和一相的内部，线圈通常是串联的。特别是在巨型同步电机和异步电机中均需构成绕组的并联支路（见图2.4）。

三相绕组最为重要，它适用于三相供电系统。三相电机的电枢绕组常称为三相绕组。单相绕组主要用来制造为牵引电气机车供电的单相发电机。因为很少有二相电网，所以两相绕组只在小型绕线转子和具有起动绕组的单相异步电机中采用。三相以上的绕组很少见。

相绕组可以构成单层或双层绕组。由于成型线圈在工艺上比较容易加工、节距容易缩短和计算灵活性较大，因而双层绕组优先用于较大型电机。在较小型异步电机中广泛采用单层绕组（制成矩形框形绕组或梯形框形绕组）。这种绕组越来越多地采用机器绕制。

2.1 绕组构成规则

假设一个多相绕组的每个线圈组具有相同数目的线圈，即绕组只构成同样大的绕组相带，那么它的设计和接线既简单又明了。这种绕组已在《旋转电机理论》第6.1节中介绍，在每对极下都重复出现。假如各线圈组的线圈数不相同，则绕组在每对极下不重复出现，而且不能马上就看出它的对称性。下一节主要目的求解多相电枢绕组的重复循环组和判断对称条件。

2.1.1 相带构成规则

由1.1.1节可知，一相并排放置的线圈边构成绕组的几何相带。因为在每槽每层中的相绕组上只放置一个线圈边，所以每个线圈组的线圈数 Q 等于每个绕组相带的槽数或槽距。因此，可得到一个线圈组的绕组几何相带的绝对或相对宽度

$$b_{z,g} = Q\tau_n \quad \text{或} \quad \alpha_{z,g} = Q\alpha_n \quad (2.1)$$

除特殊情况外， Q 恒为整数。整个相绕组的所有线圈组 Q 及 $b_{z,g}$ 或 $\alpha_{z,g}$ 是否相等，要通过每极每相槽数

$$q = \frac{N}{2pm} \quad (2.2)$$

来确定。习惯上常把 q 称为槽数。每极每相槽数是一套相绕组最重要的特性标志。

对于整数槽绕组， q 是一个整数。这样，每极每相槽数等于每个线圈组的线圈数 Q ，因为一个线圈组的线圈边在一个极距内占据一相中所嵌线的槽（图2.1）。对于分数槽绕组， q 不是一个整数。如2.2节所述，分数 q 只能通过不相同的 Q 值来实现。这时， Q 值必须选择使其平均值 Q_n 等于 q 。对具有空槽的绕组， Q_n 恒小于 q （表2.1）。