

DIANJI

永磁电机

下册

交流电机和直流电机

陈峻峰 编著

机械工业出版社

下册主要介绍永磁同步发电机、永磁感应子式发电机、永磁同步电动机、永磁直流电动机和永磁直流力矩电动机等的结构选择、磁铁工作图、运行特性和设计方法，书中还附有若干计算例题，以供参考。

本书可供从事电机研究、设计和制造的技术人员，以及大专院校有关专业的师生参考。

本书上、下册初稿写成后由广州电器科学研究所邱树人、林文硕和于仁仲等同志分别主持了审稿会，在此再一次向他们表示衷心的感谢。

永 磁 电 机
下 册
交流电机和直流电机
陈峻峰 编著

*

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）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $13 \frac{1}{4}$ · 字数 293 千字

1983 年 4 月北京第一版 · 1983 年 4 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,100 · 定价 1.65 元

*

统一书号：15033 · 5386

目 录

第七章 永磁同步发电机的结构选择和运行特性.....	1
7-1 圆柱形转子	1
7-2 无极靴星形转子	3
7-3 有极靴星形转子	9
7-4 爪极式转子	15
7-5 切向式转子和其他结构型式	19
7-6 空载运行和磁铁工作图	21
7-7 负载运行——纵轴电枢反应和磁铁工作图	31
7-8 负载运行——横轴电枢反应	40
7-9 永磁同步发电机的向量图	42
7-10 工作性稳定处理	42
7-11 磁路饱和时回复直线起始点和短路电流的计算	50
7-12 电磁特性和工作特性	52
第八章 永磁同步发电机设计	58
8-1 设计任务	58
8-2 设计中的若干概念	60
8-3 确定永磁材料的体积	63
8-4 确定磁铁和转子的主要尺寸	70
8-5 爪极尺寸的相互关系	78
8-6 确定电枢绕组数据	85
8-7 确定定子主要尺寸	89
8-8 磁路计算的任务和一般方法	91
8-9 阻抗计算	101
8-10 求解磁铁工作图	103
8-11 初设计的验算和调整	105

IV

8-12	外特性计算	106
8-13	计算例题	111
第九章	永磁交流发电机的电压稳定和调整	137
9-1	调整发电机的电磁参数来稳定电压	137
9-2	采用电容器稳定电压	138
9-3	采用可控电容器稳定电压	143
9-4	采用非线性电容器稳定电压	145
9-5	采用可控饱和电抗器来稳定和调整电压	146
9-6	用改变电枢轭部磁导来调整电压	152
9-7	汽车拖拉机用永磁发电机的电压调整	160
9-8	永磁交流发电机稳压系统的选择	163
第十章	永磁感应子式发电机	166
10-1	感应子式发电机的原理和结构	166
10-2	磁导波和有效磁通波的基本概念	172
10-3	空载等值磁路图及其求解	178
10-4	电枢反应和电枢反应磁路图	184
10-5	负载等值磁路图和磁铁工作图	189
10-6	工作性稳定处理	191
10-7	永磁感应子式发电机的设计任务和齿数选择	194
10-8	确定电机的主要尺寸	196
10-9	确定电机的其他尺寸和绕组数据	201
10-10	磁路计算	203
第十一章	永磁同步电动机	210
11-1	永磁同步电动机的结构种类	210
11-2	永磁同步电动机的向量图和磁铁工作图	213
11-3	反接状态和回复直线的起始点	217
11-4	永磁同步电动机的异步起动	223
11-5	永磁同步电动机的工作特性	227
11-6	永磁同步电动机的设计任务和出发点	230

11-7	确定永磁同步电动机的磁铁尺寸、磁路尺寸和 绕组数据	233
11-8	永磁同步电动机的磁路、阻抗和特性计算	237
11-9	永磁同步电动机的起动特性计算	240
11-10	永磁低速同步电动机	242
11-11	永磁低速同步电动机的气隙磁场	248
11-12	永磁低速同步电动机的等值磁路图和磁铁工作图	257
11-13	永磁低速同步电动机的电枢反应电抗和工作特性	264
11-14	永磁低速同步电动机计算	268
11-15	自起动自定向永磁同步电动机	276
第十二章	永磁直流电机的结构选择和运行特性	281
12-1	概述	281
12-2	驱动用永磁直流电动机	281
12-3	永磁直流伺服电动机	284
12-4	永磁电磁混合式直流伺服电动机	289
12-5	永磁直流稳速电动机	292
12-6	永磁直流测速发电机	296
12-7	永磁直流电机的纵轴磁铁工作图	297
12-8	永磁直流电机的横轴电枢反应	303
12-9	永磁直流电动机的工作特性计算	313
第十三章	永磁直流电机设计	314
13-1	概述	314
13-2	驱动用永磁直流电动机设计	318
13-3	驱动用永磁直流电动机计算例题	327
13-4	微型铁氧体直流电动机设计	348
13-5	永磁直流伺服电动机设计	359
13-6	永磁直流发电机设计	366
13-7	永磁直流测速发电机设计	368
第十四章	永磁直流力矩电动机	375

V

14-1	结构概况	375
14-2	直流力矩电动机的性能指标	378
14-3	空载磁铁工作图和近似算法	381
14-4	横轴电枢反应的作用	386
14-5	永磁直流力矩电动机的设计任务和主要尺寸	390
14-6	永磁直流力矩电动机的绕组设计特点	395
14-7	特性计算	397
14-8	无刷永磁直流力矩电动机	398
附录	401
一	导磁材料磁化曲线表	401
二	电磁线规格	408
三	本书主要符号的名称	411
参考文献	415

第七章 永磁同步发电机的结构选择和运行特性

7-1 圆柱形转子

永磁同步发电机的转子结构型式很多，通常归纳为圆柱形转子、无极靴星形转子、有极靴星形转子、爪极式转子和切向式转子等几种。选择转子类型时一般应考虑下列因素：

(1) 发电机的技术指标，如容量、转速、频率、电压调整率或电势波形等；(2) 发电机的运用场合和环境条件；(3) 所用永磁材料的特性；(4) 电机的负载性质和过载能力，如额定运行、稳态短路和瞬态短路等；(5) 结构上的牢固性和可靠性；(6) 制造工艺性和成本等等。

在上述几种转子结构中，圆柱形转子出现最早。永久磁铁制成空心圆柱体，浇铸或压制在非磁性（如铝合金等）套筒上，与转轴紧配，如图 7-1 所示。

圆柱形永磁转子可以作成二极或四极，最多不超过八极，径向充磁。当极数 $2p$

$= 2$ 时，可以采用各向异性永磁合金。当 $2p > 2$ 时，应采用各向同性合金。永磁材料大都采用铸造型铝镍和铝镍钴合金，

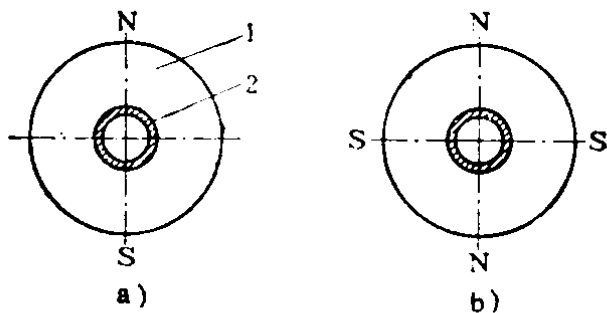


图7-1 空心圆柱形永磁转子的结构原理图

a) $2p = 2$ b) $2p = 4$

1—永久磁铁 2—套筒

不宜用高矫顽力的铁氧体和稀土钴合金。微型低压发电机可采用马氏体钢，加工方便，成本低廉。

圆柱形永磁转子的主要优点是结构简单，制造方便，除了表面需要精磨外，其余部分不需要机械加工。转子表面光滑无槽，噪音和风摩擦很小。广泛用来作成自行车和矿井用照明发电机。此外，还用来作成微型交流测速发电机，用于航空工业、机电工业和仪器仪表工业中。

圆柱形永磁转子的主要缺点是磁铁的平均长度 l_m 很短，磁铁的利用率较差；尤其当极数增多时更为显著。因此只适用于极数不多的微型发电机，其制造容量从数百毫瓦到数瓦，很少作成几十瓦，最大到 100 瓦。

圆柱形转子仅适用于对电势波形的正弦性要求不高的场合。在雷达扫描、地震测量、卫星地面跟踪或其他自动控制系统中，作为基准电压发电机的永磁电机，对电势波形的正弦性要求很高。例如有些系统要求电势波形的失真度小于 0.5%，此时空心圆柱形永磁转子就不能满足技术要求。

由电机原理可知，为了得到正弦形的输出电势，首先应

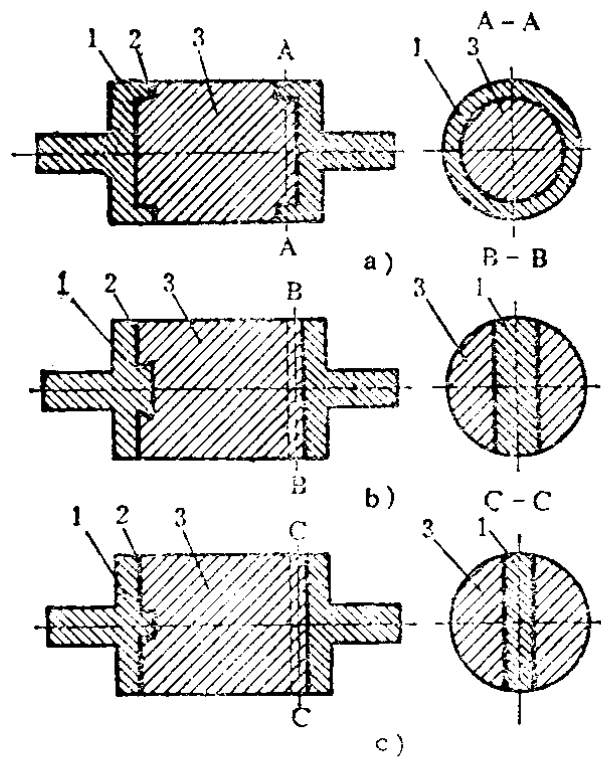


图7-2 无轴孔实心圆柱形永磁转子
a) 止口结构 b) 燕尾槽结构 c) 直槽结构
1—带柄的转轴 2—粘合剂 3—无轴孔
实心圆柱形磁铁

改善电机气隙磁场的分布，使其尽量趋近于正弦形（例如电磁式同步发电机可以采用不均匀气隙和适当的极弧系数）。此外，还可以采用正弦绕组，短距绕组、斜槽和斜极的方法，以消除高次谐波。

空心圆柱形永磁转子不能采用不均匀气隙，磁铁的磁势沿圆周表面又是不相等的，因此不能得到正弦性很高的气隙磁场分布。实践和计算证明，如果采用实心圆柱形磁铁，当 $2p = 2$ 时，就能得到正弦性很高的气隙磁场分布〔81〕。

实心圆柱形转子的结构如图 7-2 所示，为使磁铁与转轴紧固连结，磁铁的轴向两端应有止口（图 7-2 a）、燕尾槽（图 7-2 b）或直槽（图 7-2 c）。转轴分成两段，每段的一端与永久磁铁相对应。也有止口、燕尾形凸筋或长方形凸筋，用粘合剂 2 与磁铁 3 牢固地粘合成一整体。当采用燕尾槽或直槽时，两端槽形应相互垂直，以增加结构牢固性。实心磁铁结构比较复杂，加工费时，成本稍高，但机械牢固性和输出电势波形都能满足运行要求。

7-2 无极靴星形转子

圆柱形永磁转子的磁铁平均长度较短，极间很大一部分磁铁作用不大。此外，由于横轴电枢反应磁势的最大值处于中性对称平面，极间磁铁使横轴电枢反应磁通增大，如果将这部分磁铁去掉，磁铁的平均长度增长，体积减少，横轴电枢反应的作用减弱。这样改进后就成无极靴星形转子。

磁铁和转轴的紧固方式很多。一般用途微型发电机，可以将磁铁直接浇铸或压制在转轴上，如图 7-3 所示。

无极靴星形转子没有软铁极靴，由于永磁材料的电阻率很大（ $0.7 \sim 0.8 \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2 / \text{米}$ ），当发电机负载变化或瞬态短路

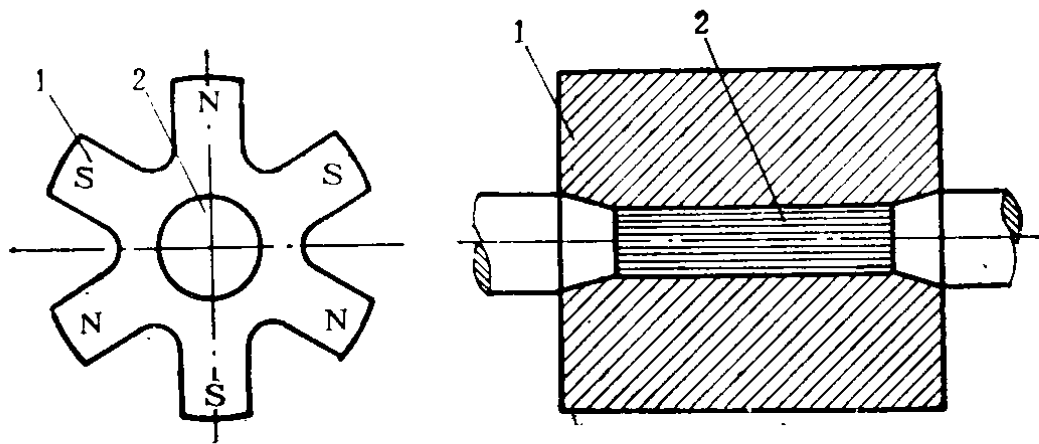


图7-3 六极无极靴星形转子的紧固方式

1—星形磁铁 2—转轴

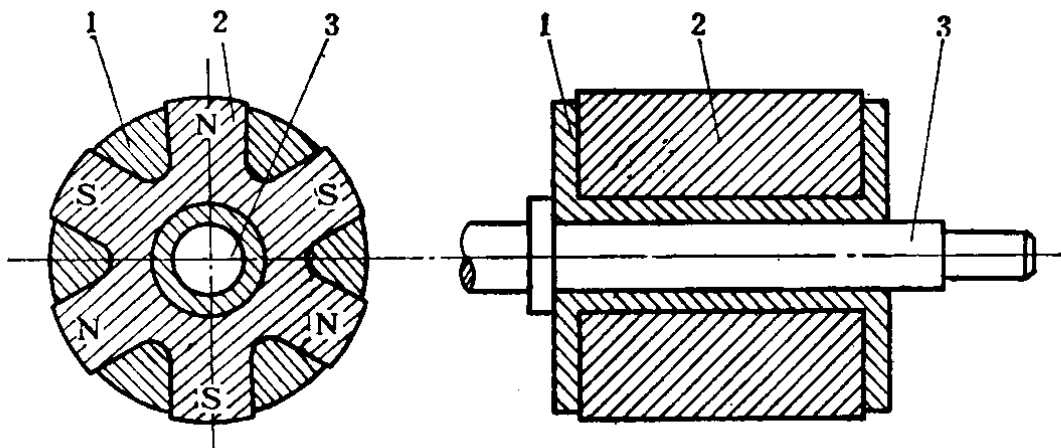


图7-4 具有非磁性套筒和极间浇铸物的无极靴星形转子结构

1—非磁性合金 2—星形磁铁 3—转轴

时，磁铁的阻尼作用很小，去磁作用较大。为了保护磁铁，可在极间浇铸非磁性合金。为了避免磁性转轴对磁铁起磁分路作用，可采用非磁性套筒。这样，就可以把极间非磁性材料和套筒浇铸成一整体，然后压入转轴，如图7-4所示。图示结构虽较复杂，但能改善发电机在短路状态时的工作特性。经验证明，当采用铝合金浇铸时，可提高永磁材料的利用率和发电机的容量。

上述结构适用于微小容量发电机，在航空工业和汽车拖

拉机中应用较广，它们的定子可以作成三相、二相或单相，三相定子和一般电磁式同步发电机相似。为了简化制造工艺，适应大批生产，二相和单相定子往往采用凸极铁心和集中绕组，如图7-5所示。图7-5 a 绘出六极单相发电机，定子铁心有6个凸极。图7-5 b 为六极二相发电机，定子铁心有12个凸极，交错放置二相绕组。

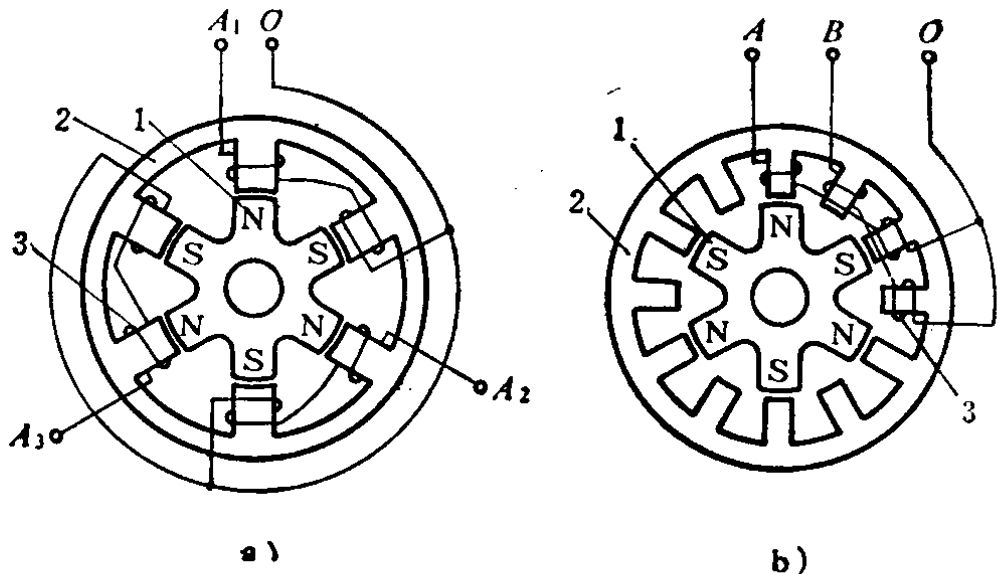


图7-5 单相和二相发电机的结构原理图

a) 单相 b) 二相 1—永磁转子 2—定子铁心 3—定子绕组

无极靴星形转子可以作成电源用、测速用或二者通用的发电机。可用斜极改善电势波形。图7-6 绘出四极10伏安航空发电机的转子结构。

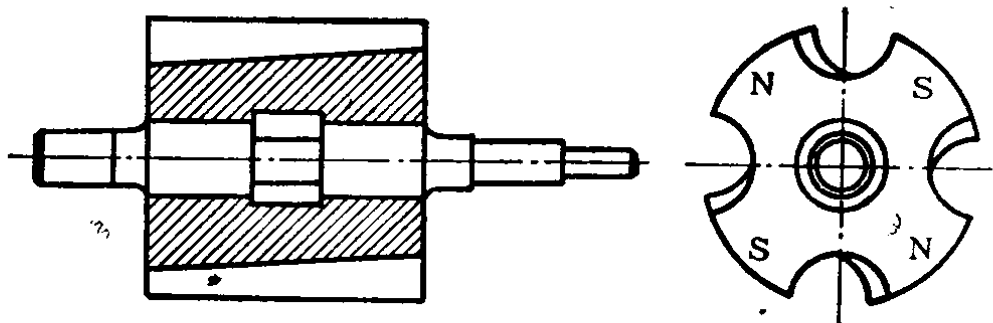


图7-6 四极10伏安航空发电机的转子

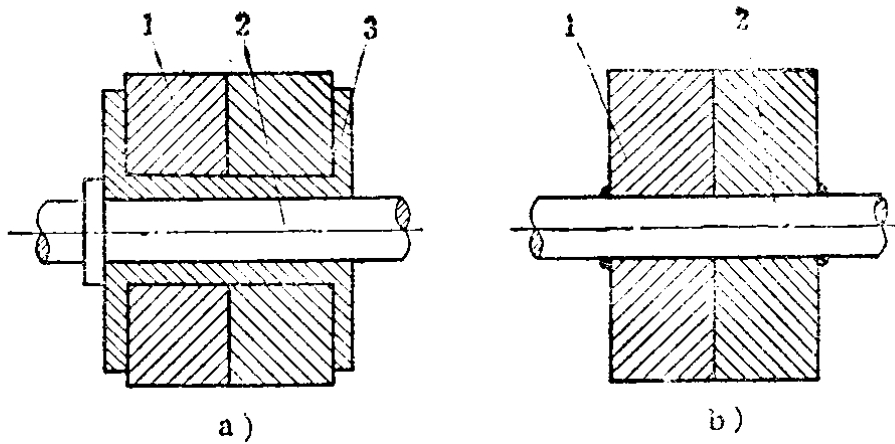


图7-7 组合式磁铁结构

a) 浇铸结构 b) 焊接结构

1—星形磁铁 2—转轴 3—非磁性浇铸物

如第二章所述,磁铁的磁性能与其大小和制造工艺有关,永磁体越大,制造工艺越复杂,磁性能越低。因此,当发电机的容量增大时,为了提高磁铁的磁性能,应该采用组合式磁铁,即将整个永磁体沿轴向分成若干段,图7-7绘出两段磁铁组成的转子。图7-8为发电机容量较大、磁铁分成若干段且带有套筒和轭的转子结构。

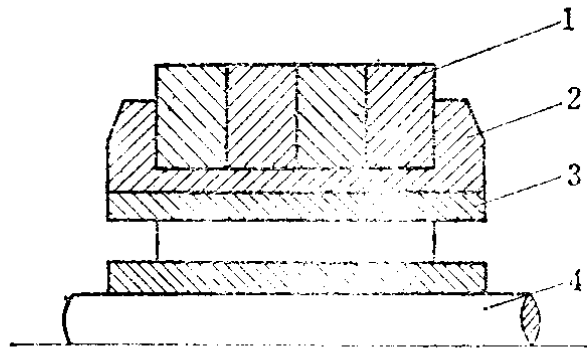


图7-8 分成若干段的无极靴星形转子的结构

1—星形永久磁铁 2—非磁性套筒

3—转子轭 4—转轴

无极靴星形转子与圆柱形转子相比,

结构较为复杂;但磁铁的磁性能和利用程度较高。与后面几种结构相比,结构简单,制造方便,永磁材料体积占转子体积之比较高。由于没有软铁极靴,所以电机的尺寸较小。

无极靴星形转子与后面介绍的有极靴星形转子和爪极式

转子相比，存在以下主要缺点：

(1) 永磁体作成多极星形，不能作成简单的圆柱形、矩形或圆筒形，因此磁铁的形状比较复杂，磁性能较差。如果用永磁材料标准中所规定的的数据计算，实测值往往低于计算值，其偏低值与具体形状和尺寸有关，在计算时难于反映出来。

无极靴星形转子通常作成二极、四极和六极，不宜超过六极。极数越多，形状越复杂，磁性能越差。

(2) 永磁材料没有充分地利用，下面用图 7-9 的四极星形转子来说明。图 7-9 b 把磁铁分成许多平行的单元磁铁，每一条单元磁铁的长度是不相等的，沿磁极中心线处 bb' 单元段最长，外侧 aa' 单元段最短。磁铁充磁时， aa' 段的磁化强度最高， bb' 段最低，造成永磁体的不均匀磁化，如图 7-9 c 所示。当然，磁化状态的不均匀性还与充磁机的容量有关，容量越小，不均匀性越大。此外，由于存在极间漏磁通，引起磁化方向的磁感应不相等。例如当采用外充磁法时，由于存在图 7-9 d 所示的漏磁通，使 ab 截面的磁感应最高， cc' 截面次之，而磁铁中性对称截面 dd' 处最小。除了上述不均匀磁化外，在磁铁的中间背部，即图 7-9 d 中绘细斜线的部分，磁铁很可能没有被磁化，磁铁没有被利用。所有上述原因，都使磁铁的磁性能变差，磁铁的利用程度降低。

充磁以后，极间漏磁通对磁感应分布的影响恰恰相反。在图 7-10 中，由于存在 Φ_{sm} ，使磁铁中性对称截面的磁感应最大，两端最小，促使磁铁的利用情况更差。

充磁时漏磁通对磁化状态的影响，可用内充磁法改善。在图 7-11 中，漏磁通的作用使 $\Phi_{dd'} > \Phi_{cc'}$ ，改善了沿磁铁长度方向磁感应的不均匀性。但是，对于微小型多极星形转子，

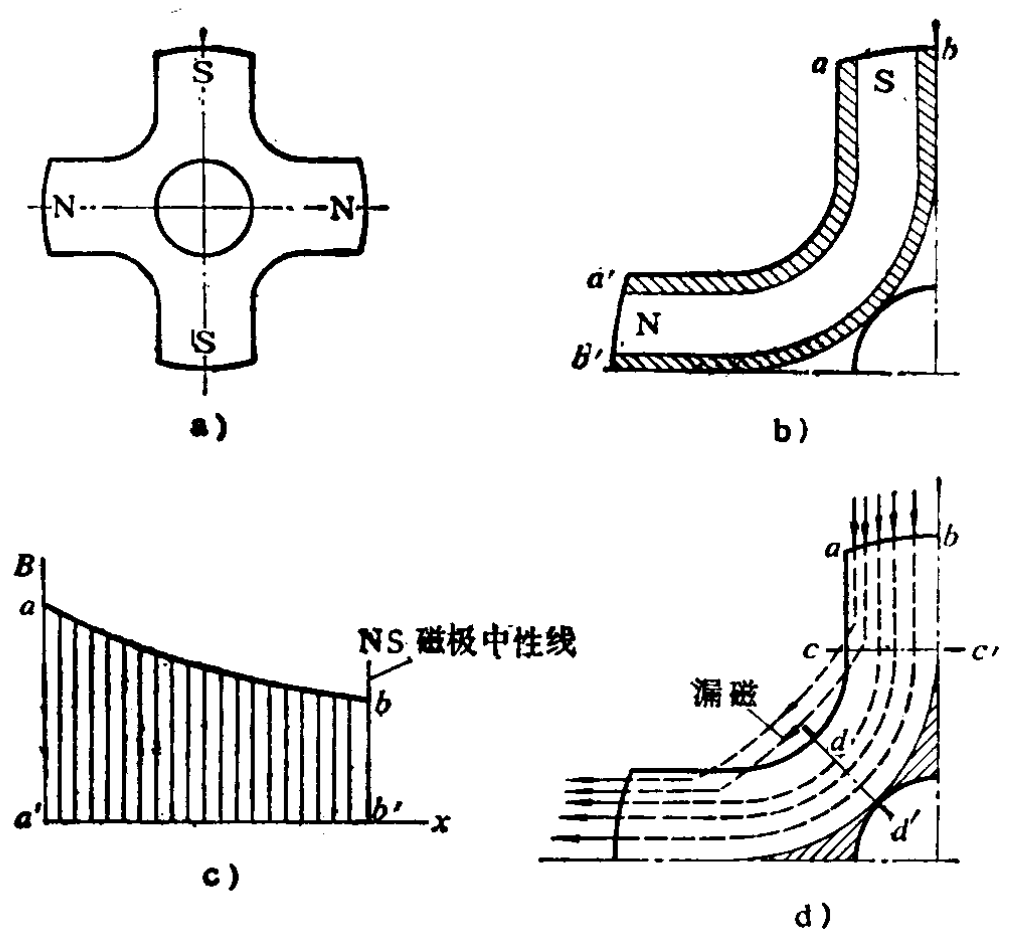


图7-9 无极靴星形转子的磁化情况

a) 四极星形转子 b) 两条并联的单元磁铁 c) 磁铁某一截面的磁感应分布 d) 充磁时的磁通分布 ($B_c > B_d$; $\Phi_{cc'} > \Phi_{dd'}$)

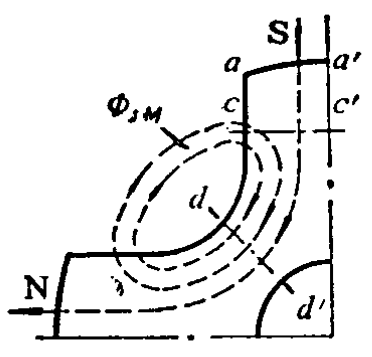


图7-10 充磁后星形转子的磁通 ($\Phi_{dd'} > \Phi_{cc'}$)

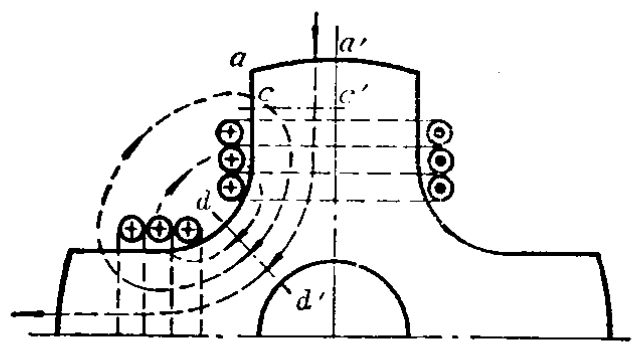


图7-11 内充磁时漏磁通的影响 ($\Phi_{dd'} > \Phi_{cc'}$)

由于磁极空间很小，采用内充磁法比较困难。

(3) 发电机瞬态运行时，磁路系统的阻尼作用不大，即使在极间浇铸非磁性合金，瞬态短路电流对磁铁的去磁作用仍然较大。尤其是单相发电机，由于逆磁场的作用，磁路系统的阻尼作用更为主要。为了减小电枢反应对磁铁的去磁作用，应选用高矫顽力的永磁材料或增长磁铁的长度。

(4) 磁铁没有保护性软铁极靴，横轴电枢反应直接作用在磁铁上，在发电机短路或过载以后，很可能引起磁铁局部的不可逆去磁，造成气隙磁场畸变。

(5) 除二极可以采用各向异性永磁材料外，多极转子只适宜用各向同性的永磁材料，限制了高磁性能各向异性材料的应用。和圆柱形转子一样，目前一般采用各向同性铝镍和铝镍钴合金或马氏体钢，不适宜采用铁氧体和稀土钴永磁合金。

(6) 无极靴星形转子在结构上没有其他加固措施，其转子外径、转速和电机容量都受到永磁材料机械强度的限制。例如现有铝镍和铝镍钴合金的圆周表面线速度不应超过30~50米/秒。

由于上述诸原因，无极靴星形转子发电机的制造容量不大。例如汽车拖拉机用发电机达200伏安，航空用发电机达1000伏安，测速发电机的容量仅达十几伏安，当频率为400赫时，发电机的容量达1.5~2千伏安；当频率提高到1000赫时，容量可达3~5千伏安。当然，随着永磁材料的发展，发电机的制造容量相应提高，近年已达十几千伏安。

7-3 有极靴星形转子

如果在无极靴星形转子的磁铁两端装上软铁极靴，不但

能保护磁铁免受横轴电枢反应去磁之虞，选择适当的极靴形状，还可改善气隙磁场的波形，调整空载漏磁系数和磁铁工作点的位置。

有极靴星形转子的简单结构如图 7-12 和 7-13 所示。图中永久磁铁制成多极星形整体，软铁极靴可用铆钉或螺钉与磁铁固接，但在制造磁铁时应预先埋入嵌件。为了使极靴与磁铁精密吻合，减小二者之间的附加气隙，极靴内表面和磁铁外表面都应精磨。为了改善气隙磁场的波形，可以采用不均匀气隙，或选用适当的极弧系数。

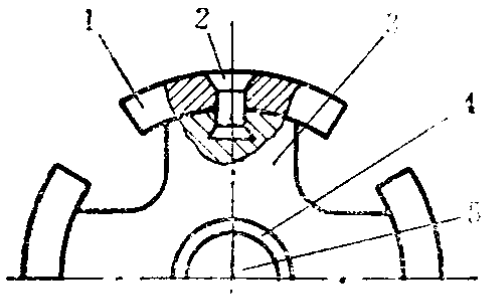


图7-12 有极靴星形
转子（铆接）

1—软铁极靴 2—铆钉 3—星形
磁铁 4—非磁性套筒 5—转轴

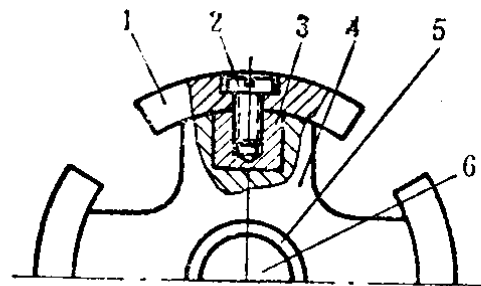


图7-13 有极靴星形
转子（螺钉紧固）

1—软铁极靴 2—螺钉 3—嵌件
(软铁) 4—星形磁铁 5—非磁
性套筒 6—转轴

上述结构工艺较复杂，机械强度不高，铆钉和软铁嵌件对磁铁的磁性能不利。图 7-14 的结构对此作了改进，极靴 2 的轴向两端带有止口，先在专门的浇铸模中将它们与多极星形磁铁 3 镶配好，然后用非磁性合金 1 将它们浇铸成一整体。这不但解决了极靴与磁铁的紧固问题，而且极间浇铸物还起到阻尼作用，进一步改善了发电机的瞬态特性。

有时还可以采用图 7-15 所示的钢环结构，钢环由磁性钢 1 和非磁性钢 2 逐段焊成。但只适宜于二极和四极。极数增

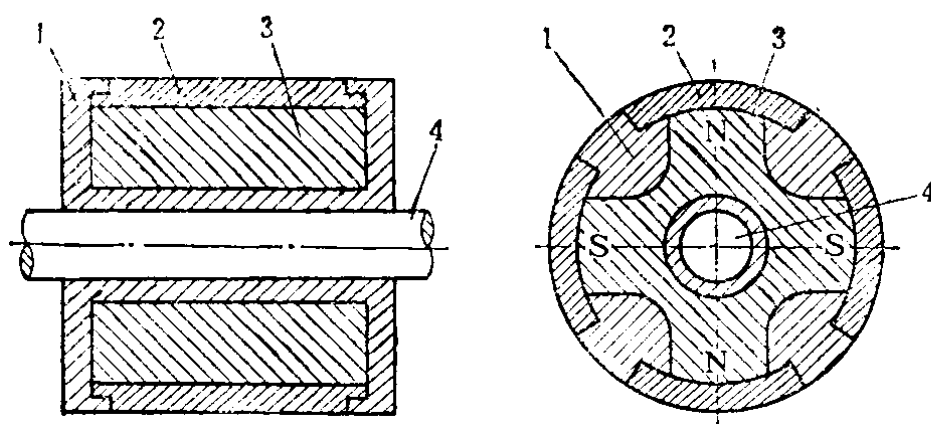


图7-14 利用浇铸法紧固的有极靴星形转子

1—非磁性合金（浇铸物） 2—极靴 3—多极星形磁铁 4—转轴

加时，制造工艺较难。

高速发电机可以采用图7-16所示的转子结构，磁铁外圆用整体钢环箍紧。钢环用特殊的不锈钢制成，这种不锈钢在 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 高频热处理后变成非磁性材料[12]。因此极间部分可用特殊的高频热处理法处理。

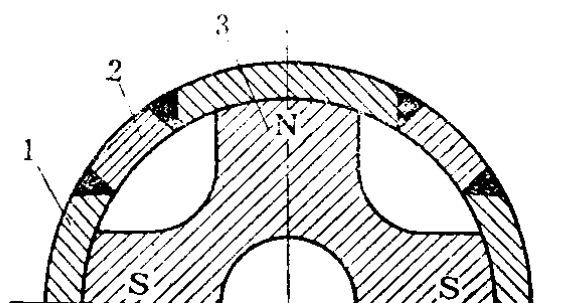


图7-15 焊接钢环的结构

1—极靴（磁性钢） 2—非磁性钢
3—多极星形磁铁

上述几种结构都采用整体星形磁铁，仍然存在上节所述磁性能较差和磁铁利

用程度不高的缺点。对于容量较大的发电机，目前广泛采用矩形磁铁，用装配法或浇铸法将它们与极靴和转子导磁轭组合成整体。矩形磁铁可以采用高磁能高矫顽力的各向异性或晶体取向永磁合金，磁化充分而均匀，提高了永磁材料的利用率。

图7-17为装配式结构，转子内部设有磁轭4，每块矩形