

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200410009650.9

[51] Int. Cl.

H02K 21/12 (2006.01)

H02K 1/27 (2006.01)

H02K 1/16 (2006.01)

[43] 公开日 2006年4月19日

[11] 公开号 CN 1761130A

[22] 申请日 2004.10.11

[21] 申请号 200410009650.9

[71] 申请人 中国科学院电工研究所

地址 100080 北京市海淀区中关村北二条6号

[72] 发明人 杜玉梅 杨 劼 金能强 李耀华
史黎明

[74] 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公司

代理人 关 玲 刘秀娟

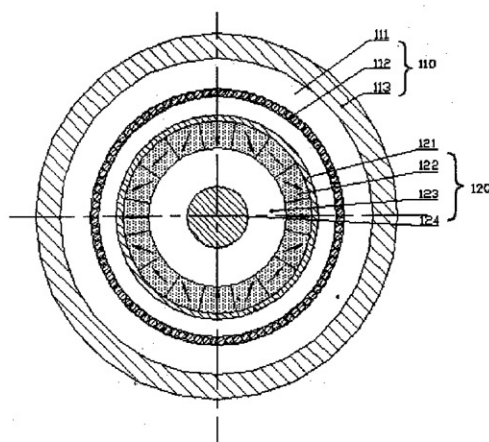
权利要求书1页 说明书8页 附图5页

[54] 发明名称

一种永磁同步电动机

[57] 摘要

一种永磁同步电动机，其转子由永磁磁极、磁极固定套、磁轭及转轴组成。永磁磁极的构成采用Halbach磁体阵列形式，即：磁极由磁化方向按规律变化的单元磁块组成，所形成的磁极磁化方向沿径向。通过调整磁体块数、磁化方向，可在气隙中产生空间正弦形磁场，并可使气隙磁场得到增强。其定子由定子铁芯、绕组及机座共同构成。铁芯为无齿槽结构，三相或多相绕组布置在定子铁芯表面上，形成气隙绕组，以消除由于齿槽效应而产生的气隙磁场高次谐波。此种结构的永磁同步电动机既可以在大气隙中产生强磁场，又能有效抑制或消除转矩波动，特别是电机在低速运行时的转矩波动。



1、一种永磁同步电动机，其转子（120）由永磁磁极（122）、磁极固定套（121）、磁轭（123）及转轴（124）组成，其定子（110）为电枢，由三相或多相绕组（112）、定子铁芯（111）及机座（113）构成，其特征
5 在于：转子永磁磁极（122）由 Halbach 式的磁块阵列构成，定子电枢为无齿槽结构。

2、根据权利要求 1 所述的永磁同步电动机，其特征在于：构成所述的转子永磁磁极（122）的 Halbach 式磁块阵列是采用多个永磁扇形或梯形单元磁块组合来构成径向磁极，各磁块的磁化强度矢量 \vec{M} 有规律地逐渐变
10 化，即， $\theta_m = (1 \pm p)\theta$ ($p=1,2,3,\dots$)，式中 p 为永磁磁极对数， θ_m 为 \vec{M} 与 X 轴的夹角， θ 为通过某一扇形磁块中心的半径与 X 轴的夹角。

3、根据权利要求 1 和 2 所述的永磁同步电动机，其特征在于：所述的定子铁心为硅钢片迭成的无齿槽铁芯（111），三相或多相绕组（112）排列在定子无齿槽铁芯（111）表面，采用粘结或机械方式固定，形成气隙绕
15 组。

4、根据权利要求 1 至 3 的任何一项所述的永磁同步电动机，其特征在于：所述的转子永磁磁极（122）的磁极内外放置均可。

5、根据权利要求 1 至 4 的任何一项所述的永磁同步电动机，其特征是所述的转子永磁磁极（122）为稀土钴系、铁氧体系、钕铁硼系永磁合金材料
20 制成，优选钕铁硼永磁材料。

6、根据权利要求 1 至 5 的任何一项所述的永磁同步电动机，其特征是所述的转子永磁磁极（122）采用固定套固定磁钢，磁钢固定套可以是非导磁高强度环氧树脂玻璃钢套，或者是环氧树脂碳纤维套，或者采用导磁或非导
磁性的高强度金属套。

一种永磁同步电动机

技术领域

5 本发明属于电动机领域，特别是涉及一种永磁同步电动机。

技术背景

同步电动机是一种动力机械，可用于拖动各种机械，如空气压缩机、鼓风机、水泵、机床、电动车辆、舰船等。与同容量的异步电动机相比，同步电动机具有功率因数高、效率高，并且能够改善电网功率因数的优点。与电力电子变频电源配合使用，可使同步电动机实现自起动及调速运行。随着电力电子技术的发展，变频电源成本降低，同步电动机的使用场合将会越来越广泛。

传统电励磁结构同步电动机，其转子上设置有电励磁磁极，其定子与普通异步电动机一样，铁芯带有齿槽，槽中嵌有三相或多相绕组。当采用永磁磁体取代电励磁磁体来提供励磁磁场时，即可构成永磁同步电动机。与电励磁同步电动机相比，永磁同步电动机更具有能量密度高，效率高，维护方便，结构简单等优点。随着永磁材料性能的提高及价格的降低，永磁同步电动机在国防、工农业生产等行业将会得到广泛应用。

既有的一种永磁同步电动机结构形式如图5（以四极电机为例）所示，电机由定子210、转子220等组成。转子220包括：磁钢固定套221，径向充磁的瓦片形永磁磁体222（充磁方向为径向，如图中箭头所示），转子导磁铁芯223及转轴224。定子210包括：带齿槽的电枢铁芯211，嵌入211槽中的电枢绕组212，及定子机座213。电枢绕组212通电后，产生旋转磁场，与永磁磁体222提供的励磁磁场相作用（吸或斥），拖动转子220与电枢旋转磁场同步旋转。

此种径向充磁的瓦片形永磁磁体在气隙中产生的磁密波形如图4所示。对此波形进行傅立叶分析可知，此气隙磁密波中不仅有基波，还包含一系列的高次谐波。这些高次谐波磁密与定子电流相作用，会产生谐波转矩，迭加在基波转矩上，造成了输出转矩的波动。特别是当电机低速运行时，谐波转矩较大，不仅会使电机转矩特性变差，还会影响电机起动。如果谐波转矩造成的振动与电机固有振动频率相近，还会引起电机共振，使电机无法正常工作。因此尽可能抑制或削减电动机的谐波转矩，才能提高电机输出转矩性能，满足所驱动机械的要求。

发明内容

10 为克服现有技术的缺点；本发明提供一种改进的永磁同步电动机，可提供平稳转矩。

本发明永磁同步电动机所采用的技术方案如下：

15 本发明由定子、转子等组成。转子上设置永磁磁体，定子为电枢，转子永磁磁体的磁极内外放置均可。当永磁磁极放置在定子内部，则构成外磁场（或内磁极）电机；当永磁磁极放置在定子外部，则构成内磁场（或外磁极）电机。

本发明的特征在于：永磁磁体采用磁化方向按一定规律变化的 Halbach 式永磁磁块阵列构成，所构成的磁体磁化方向沿径向。

20 本发明的定子为无齿槽电枢铁芯结构，定子三相或多相绕组以粘结或机械方式固定在定子铁芯表面上，绕组与传统同步电机的三相或多相绕组连接和排列方式相同。定子电枢铁芯装入机座中。

所述的永磁磁体采用固定套固定，磁钢固定套可以是非导磁高强度环氧树脂玻璃钢套，或者是环氧树脂碳纤维套，或者采用导磁或非导磁性的高强度金属套。

25 本发明的特征还在于：其转子含有磁轭，磁轭既可由导磁材料制成，也可由非导磁材料制作。转轴采用非导磁材料或导磁材料构成。

本发明的永磁磁体为稀土钴系、铁氧体系、钕铁硼系永磁合金材料制成，优选钕铁硼永磁材料。

本发明与现有技术具有以下优点：

(1) 采用磁化强度矢量 \vec{M} 的方向有规律地逐渐变化的磁块构成
5 Halbach 式永磁磁极，即， $\theta_m = (1 \pm p)\theta$ ($p=1,2,3,\dots$)，式中 p 为永磁磁极对数， θ_m 为 \vec{M} 与 X 轴的夹角， θ 为通过某一扇形（或梯形）磁块中心的半径与 X 轴的夹角。可获得正弦形的气隙磁场，不再需要采用传统方式如斜槽（或斜极）、非均匀气隙极靴或分布式定子电枢绕组等对气隙波形进行修正，简化了结构，降低了制造费用。

10 (2) Halbach 式永磁磁极的聚磁效应和自屏蔽特性，可以使气隙磁场得到增强，转子轭部磁场大大减弱，充分利用了永磁材料，并有利于减小转子轭部厚度，及使转子轭部材料选择自由度提高，进而减小电机的体积和重量，节约制造成本。

15 (3) 定子采用无齿槽结构，气隙均匀，可以避免齿槽结构引起的气隙磁阻变化，排除了齿槽效应产生的谐波转矩。

(4) 上述两项改进措施相结合有利于降低或抑制电机的谐波转矩，可减小由此谐波转矩引起的转矩波动，提高电机的输出转矩质量。

附图说明

20 图 1 是本发明以四极外磁场（或内磁极）电机为例的具体实施方式的结构示意图，此结构中永磁磁极放置在定子内部。图中 110 定子、120 转子、111 定子无齿槽铁芯、112 电枢绕组、113 定子机座、121 磁极固定套、122 永磁磁极，123 转子磁轭、124 转轴；

图 2 是本发明具体实施方式的转子结构示意图（以图 1 所示的四极外磁场磁极电机为例）；

25 图 3 是本发明具体实施方式气隙磁场分布图；

图 4 是图 5 所示电机的气隙磁场分布图；

图 5 是现有技术的一种永磁同步电动机的结构示意图；

图 6 是 Halbach 式永磁磁极构成方式的说明图；

图 7(a) 是 Halbach 式内磁场式磁极及其磁力线分布，图中为四极，每极 4 块梯形磁块，箭头标明各磁块的磁化方向，数字为各磁块的编号；

5 图 7(b) 是 Halbach 式外磁场式磁极及其磁力线分布，图中为四极，每极 4 块梯形磁块，箭头标明各磁块的磁化方向，数字为各磁块的编号；

图 8 是本发明以四极内磁场（或外磁极）电机为例的具体实施方式的结构示意图，此结构中永磁磁极放置在定子外部。图中 110 为定子、120 为转子、111 为定子无齿槽铁芯、112 为电枢绕组、121 为磁极固定套、123 为
10 转子磁轭、122 为永磁磁极、124 为转轴。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

如图 1 所示，本发明的外磁场（或内磁极）电机的具体实施方式由定子 110、转子 120 等组成。定子 110 包括定子无齿槽铁芯 111，电枢绕组 112
15 及定子机座 113。转子 120 包括磁极固定套 121、永磁磁极 122，转子磁轭 123 及转轴 124。该定子 110 中的无齿槽铁芯 111 由硅钢片迭成，与机座 113 固定成一体；三相或多相电枢绕组 112 的各个绕组元件经过绕制成型，再以粘结或机械方式固定在定子无齿槽铁芯 111 的表面上，形成气隙绕组 112。永磁磁极 122 的各个磁块按照（2）式计算的方向（下面以例说明）
20 充磁后粘结在转子磁轭 123 上，然后采用磁钢固定套 121 固定。转轴 124 套入转子磁轭 123 中，形成转子 120。再与定子 110 等总装成电机。

图 2 中 Halbach 式永磁磁极 122 中的箭头表示各磁块的磁化方向（以四极外磁场式磁极为例）。

图 3 显示了电机气隙中一对极距范围内的径向磁场分布情况，横坐标为
25 用空间电角度表示的一对极距的空间范围，纵坐标为径向磁通密度值。

Halbach 阵列是一种构成永磁磁体磁块的排列方式，如图 6 所示，此种

磁体由多个磁块组成，相邻磁块的磁化方向逐渐变化，每经过一个极距，磁块的磁化方向改变 180° 电角度。通过逐渐改变磁块的数目、尺寸及相邻磁块的磁化方向，可获得正弦波形的气隙磁场，并可使气隙磁场得到增强，转子轭部磁密减弱，有利于在大气隙中获得较高磁密。

5 理想的 Halbach 式磁极应由磁化方向连续变化的磁环构成，但在工艺上实现很困难，因此需采用磁化方向按一定角度逐渐变化的扇形磁块（或将扇形磁块的圆弧用其弦来代替所形成的梯形磁块）近似构成。设所形成的电机磁极对数为 p ，每极所需扇形（或梯形）磁块数为 n ，则每磁块的空间张角 α 为：

$$10 \quad \alpha = 360^\circ / 2np \quad (n \geq 3, p \geq 1) \quad (1)$$

由于每极磁块数越多，所构成的磁极越接近理想 Halbach 式磁极，本发明设定每极磁块数 $n \geq 3$ 。

如图 6 所示， θ 为 X 轴与通过某一扇形（或梯形）磁块中心的半径之间的夹角， \vec{M} 为该磁块的磁化强度矢量， θ_m 为其磁化强度矢量 \vec{M} 与 X 轴之间的夹角，则 θ 与 θ_m 应满足公式：

$$15 \quad \theta_m = (1 \pm p)\theta \quad (p = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中， p 为电机磁极对数。“+”号对应于内磁场磁极，即定子电枢放在磁极内部；“-”号对应于外磁场磁极，即定子电枢放在磁极外部。其四极磁场分布示例分别如图 7 (a) 及 (b)。需说明的是，当 $p=1$ ，即电机为两极
20 时，只能构成内磁场磁极。

以下说明气隙磁场分布的推导：

首先做如下假设：1，所采用的永磁材料具有直线形退磁曲线，其相对磁导率 $\mu_r = 1$ ；2，忽略端部效应；3，磁极内部或者为铁磁材料（ $\mu_r = \infty$ ），
25 或者为空气（ $\mu_r = 0$ ）。

磁通密度 \vec{B} ，磁场强度 \vec{H} ，及磁化强度 \vec{M} 之间有下列关系：

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

其中 μ_0 是真空磁导率, μ_r 是材料的相对磁导率。

在极坐标系中, 磁化强度 \vec{M} 可以用下式表示:

$$\vec{M} = M \cos(p\theta) \vec{e}_r + M \sin(p\theta) \vec{e}_\theta$$

5 式中, $\vec{e}_r, \vec{e}_\theta$ 分别是径向和周向坐标的单位矢量, P 是极对对数。在 $\mu_r = 1$ 的条件下, 可以推导出 Halbach 磁极式电机的空载气隙磁场如下:

1. 对于内磁场磁极, 有

$$\begin{cases} B_r = \frac{B_{rem} P}{(1-p)} (R_o^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \times (r^{(p-1)} + R_s^{2p} r^{(-p-1)}) \cos(p\theta) \\ B_\theta = \frac{B_{rem}}{(1-p)} (R_o^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \times (-r^{(p-1)} + R_s^{2p} r^{(-p-1)}) \sin(p\theta) \end{cases} \quad P \neq 1 \text{ 时}$$

和

10

$$\begin{cases} B_r = B_{rem} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \left(1 + \frac{R_s^2}{r^2}\right) \cos(\theta) \\ B_\theta = B_{rem} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \left(-1 + \frac{R_s^2}{r^2}\right) \sin(\theta) \end{cases} \quad p = 1 \text{ 时}$$

2. 对于外磁场磁极, 有

$$\begin{cases} B_r = \frac{B_{rem} P}{(1-p)} (R_o^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \times R_s^{2p} r^{(-p-1)} \cos(p\theta) \\ B_\theta = \frac{B_{rem}}{(1-p)} (R_o^{(1-p)} - R_i^{(1-p)}) \times R_s^{2p} r^{(-p-1)} \sin(p\theta) \end{cases} \quad P \neq 1 \text{ 时}$$

和

15

$$\begin{cases} B_r = B_{rem} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \frac{R_s^2}{r^2} \cos(\theta) \\ B_\theta = B_{rem} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) \frac{R_s^2}{r^2} \sin(\theta) \end{cases} \quad p = 1 \text{ 时}$$

式中, B_{rem} 是永磁材料的剩磁, R_o 是 Halbach 磁极的外半径, R_i 是该磁极的内半径, R_s 是无槽电枢绕组的内半径。 r 是气隙半径。

从上述公式可以看出，当电机的极对数及各部分尺寸确定时，Halbach 磁极的径向及周向气隙磁场分布是正弦形的。

以下以四极永磁磁极为例，结合图 7(a)说明 Halbach 式内磁场，结合图 7(b)说明外磁场磁极的构成方式：

5 如图 7(a)，设电机为四极，每极由四块扇形磁块组成，即 $2p=4, n=4$ 。
由 (1) 式计算可得，每块扇形的空间张角为 22.5° 。设 1#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 0° ，由于是内磁场磁极，(2) 式中取“+”号，由 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 0° 。从 1#磁块沿逆时针方向排列下去，依次为 2#，3#，4#，5#16#。因此 2#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 22.5° ，由
10 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 67.5° 。3#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 45° ，由 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 135° 。其余 4#，5#16#磁块的磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴的夹角 θ_m 也可由各自的 θ 角由 (2) 式计算求得。各磁块按照计算所得的磁化方向进行充磁，然后再按照既定位置粘结，即可形成四极内磁场 Halbach 式磁极。

15 如图 7(b)，设电机为四极，每极由四块扇形磁块组成，即 $2p=4, n=4$ 。
由 (1) 式计算可得，每块扇形的空间张角为 22.5° 。设 1#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 0° ，由于是外磁场磁极，(2) 式中取“-”号，由 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 0° 。从 1#磁块沿逆时针方向排列下去，依次为 2#，3#，4#，5#16#。因此 2#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 22.5° ，由
20 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 -22.5° 。3#磁块中线与 X 轴夹角 θ 为 45° ，由 (2) 式可得，其磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴夹角 θ_m 为 -45° 。其余 4#，5#16#磁块的磁化方向 $\overset{P}{M}$ 与 X 轴的夹角 θ_m 也可由各自的 θ 角由 (2) 式计算求得。各磁块按照计算所得的磁化方向进行充磁，然后再按照既定位置粘结，即可形成四极外磁场 Halbach 式磁极。

25 如图 8 所示，本发明的内磁场（或外磁极）电机的具体实施方式与图 1 所示的实施例类似，也由定子 110、转子 120 等组成。定子 110 由定子无

齿槽铁芯 111，电枢绕组 112 等组成。转子 120 包括磁极固定套 121/转子磁轭 123（此种结构时磁极固定套 121 与转子磁轭 123 合而为一）、永磁磁极 122 及转轴 124。该定子 110 中的无齿槽铁芯 111 由硅钢片迭成，与端部设置的定子机座固定成一体；三相或多相电枢绕组 112 的各个绕组元件

5 经过绕制成型，再以粘结或机械方式固定在定子无齿槽铁芯 111 的表面上，形成气隙绕组 112。永磁磁极 122 的各磁块按照（2）式计算的方向充磁后粘结在磁极固定套 121 或转子磁轭 123 上，由于磁极旋转时受到向外的离心力作用，磁极内部不需采用磁钢固定套固定。转轴 124 与定子 110 之间采用轴承连接，以总装成电机。转子 120、定子 110 与所驱动机械之间的连

10 接可采用传统外转子电机相同的方式。

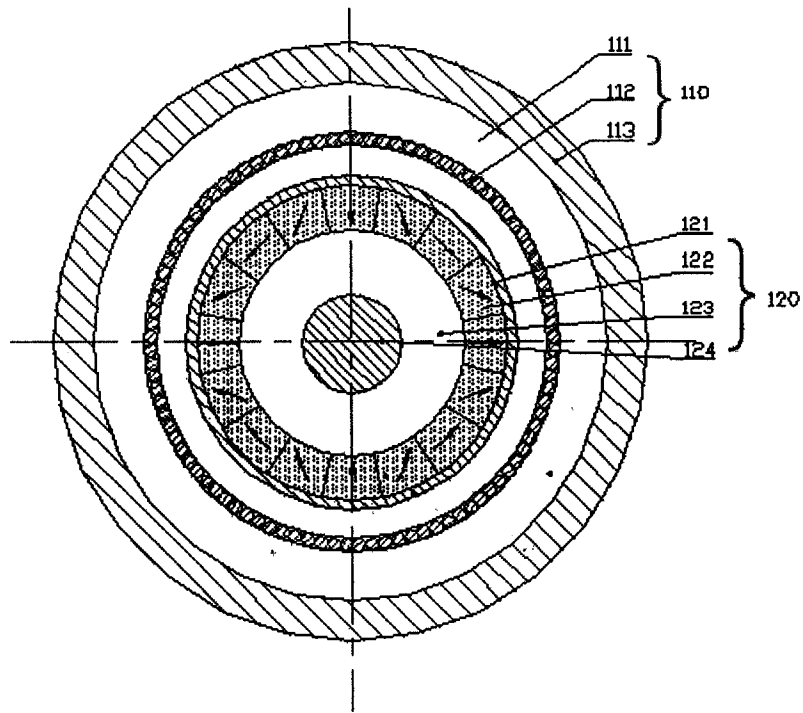


图 1

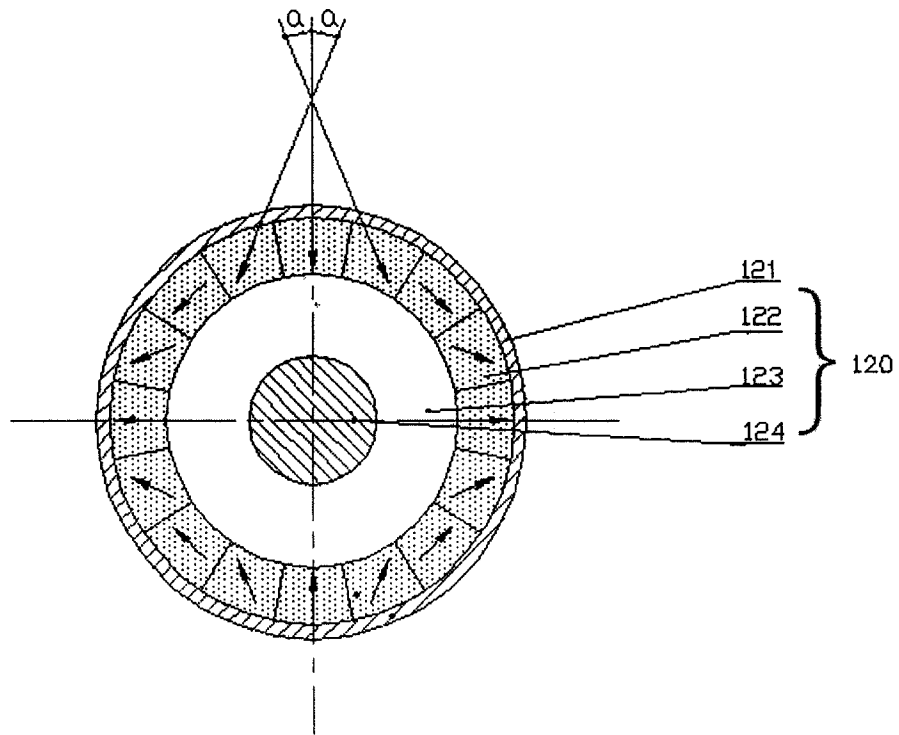


图 2

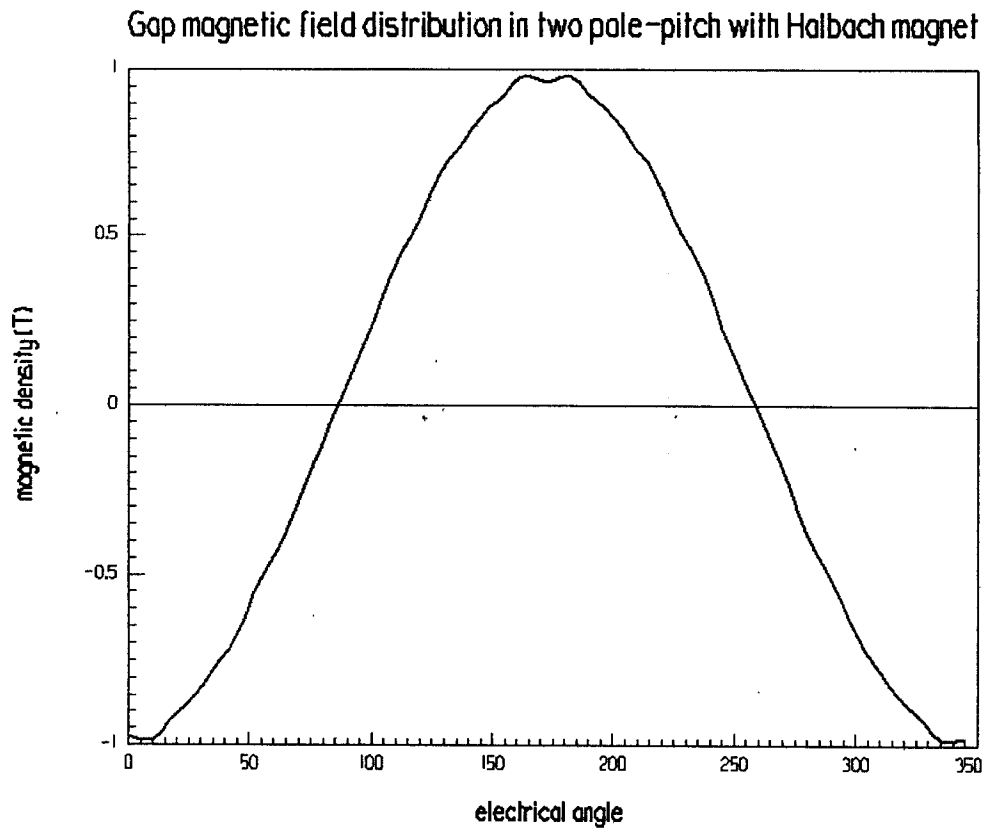


图 3

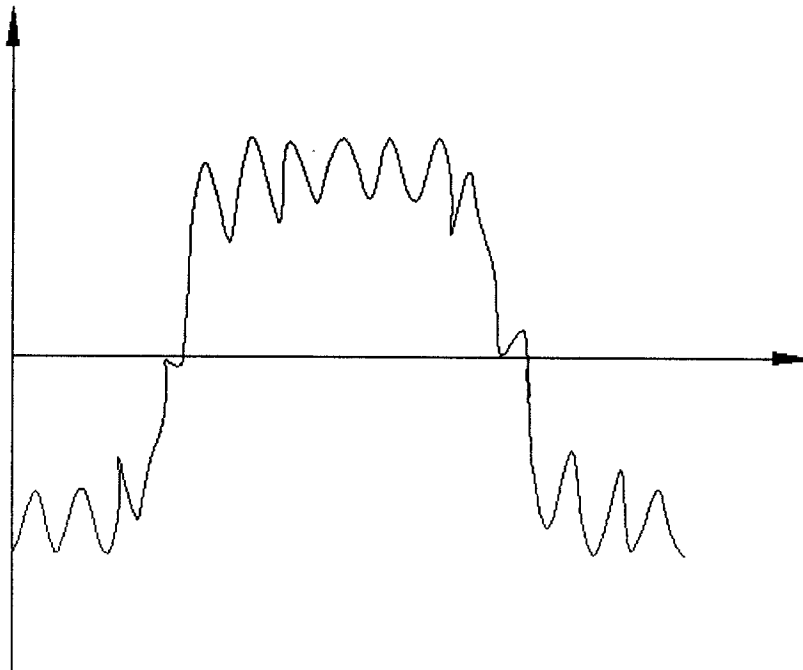


图 4

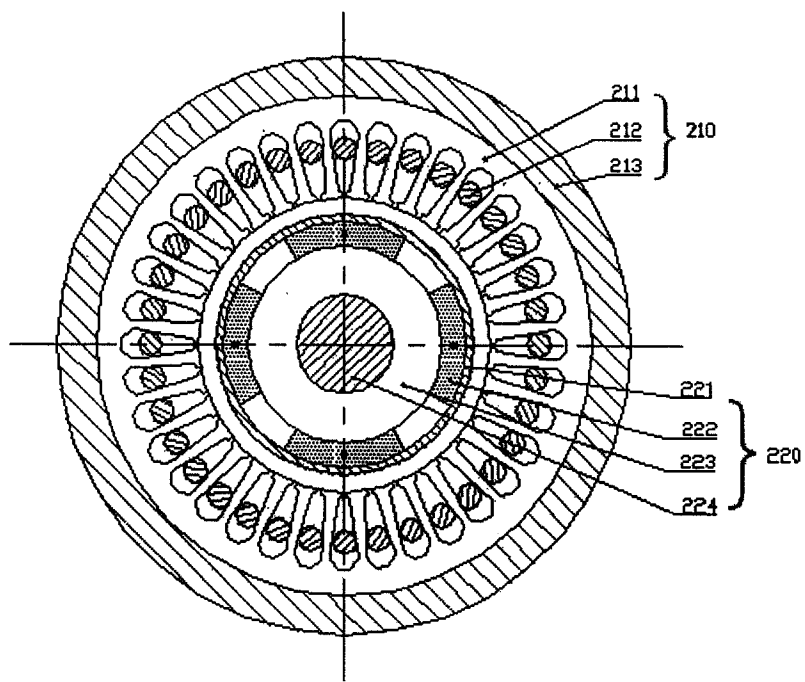


图 5

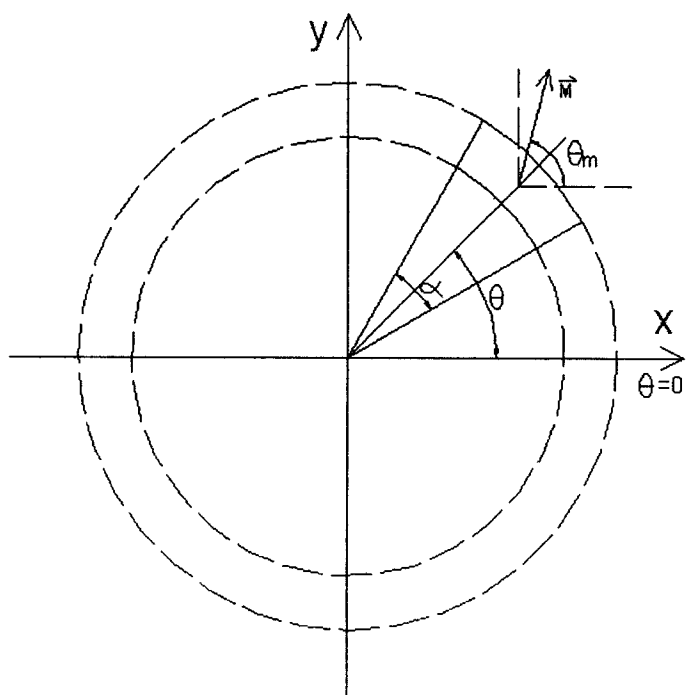


图 6

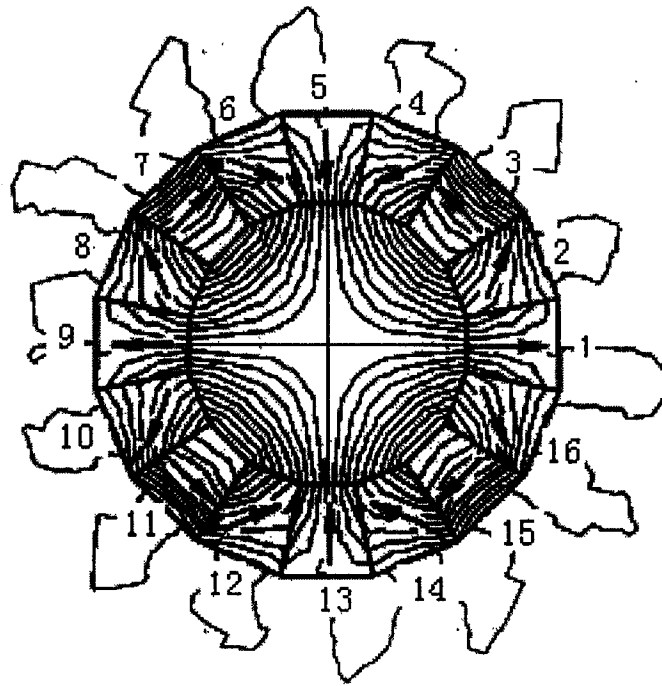


图 7(a)

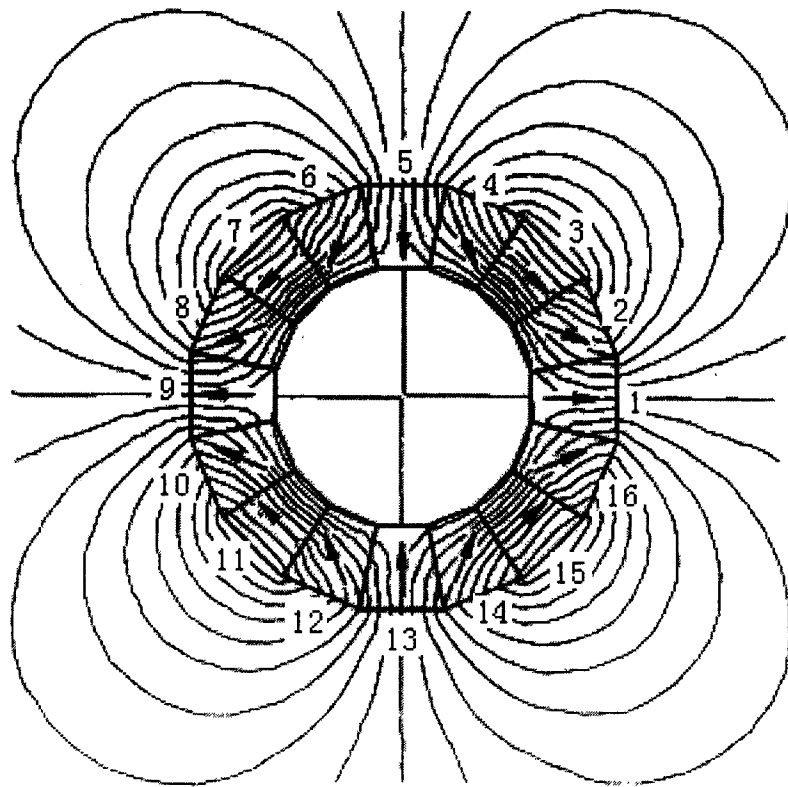


图 7(b)

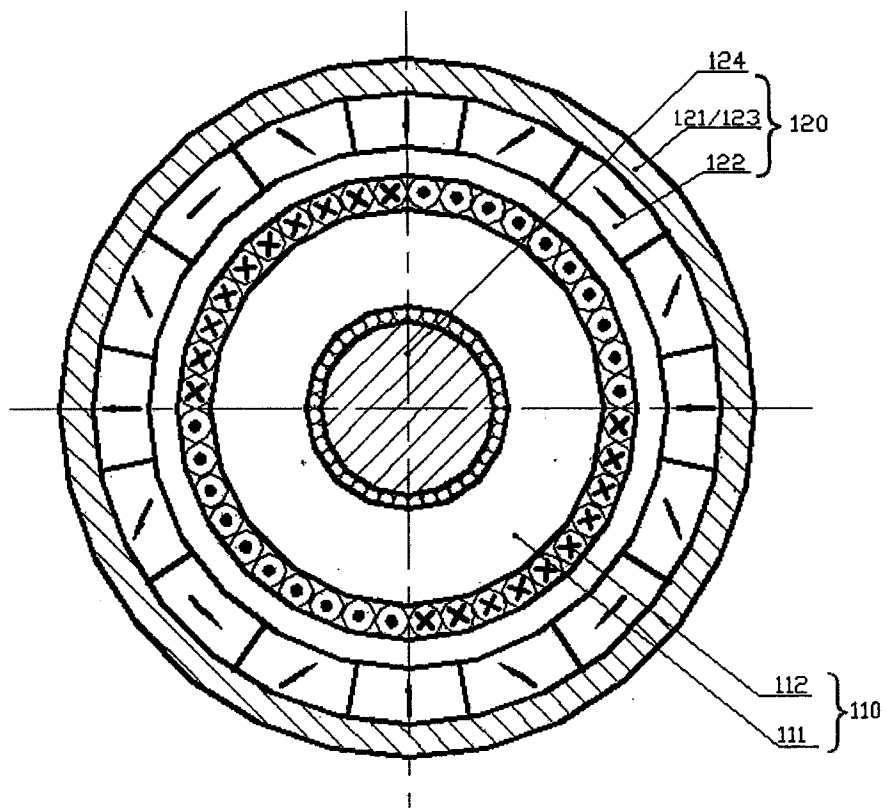


图 8