

[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl⁶

H02K 1/22

[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 96193837.4

[43]公开日 1999年4月21日

[11]公开号 CN 1214809A

[22]申请日 96.3.20 [21]申请号 96193837.4

[30]优先权

[32]95.3.21 [33]US [31]08/408,029

[86]国际申请 PCT/US96/03929 96.3.20

[87]国际公布 WO96/29774 英 96.9.26

[85]进入国家阶段日期 97.11.10

[71]申请人 宗德能源系统公司

地址 美国加利福尼亚州

[72]发明人 T·A·利波 Y·李

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

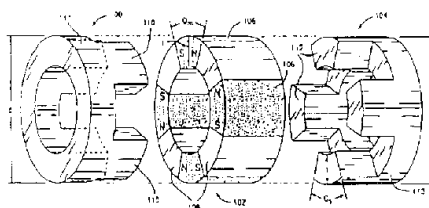
代理人 周备麟 林长安

权利要求书 4 页 说明书 13 页 附图页数 16 页

[54]发明名称 双凸极永磁电机

[57]摘要

一种双凸极永磁电机,它包括插置在一对横向配置的定子(100、104)之间的环形转子(102)。转子(102)包括许多永磁体(106),该永磁体与钢制的电磁凸极(108)交替配置。每个定子(100、104)均具有许多均匀间隔开的纵向凸极(110、112)并支承许多串联的铜线圈(126、128)。分为两组的铜线圈构成A相绕组和B相绕组。



ISSN 1008-4274

权 利 要 求 书

1.一种双凸极永磁电机,它包括:

至少两个彼此共轴固定的定子;

至少一个位于上述至少两个定子之间的转子;和

5 由上述至少两个定子支承的两相绕组。

2.如权利要求1所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述至少两个定子中的每个定子均包括许多定子凸极并具有对称轴线。

3.如权利要求2所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述定子凸极相对于上述对称轴线沿纵向成形。

10 4.如权利要求2所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述定子凸极相对于上述对称轴线沿径向成形。

5.如权利要求1所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述至少一个转子包括许多永磁体。

15 6.如权利要求5所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述永磁体与用导磁材料制成的转子电磁凸极交替配置。

7.如权利要求6所述的双凸极永磁电机,其特征在于,每个上述转子电磁凸极具有第一和第二侧,上述永磁体极化成使得上述第一侧的磁性极化度与上述第二侧相同。

20 8.如权利要求1所述的双凸极永磁电机,其特征在于,上述两相绕组包括第一和第二组线圈。

9.一种双凸极轴向磁通永磁电机,它包括:

至少两个彼此共轴并沿横向配置的定子;

至少一个配置在上述至少两个定子之间的转子;和

具有第一相和第二相的绕组,上述绕组由上述至少两个定子支承。

25 10.如权利要求9所述的双凸极轴向磁通永磁电机,其特征在于,上述至少两个定子中的每个定子均具有许多定子凸极和对称轴线。

11.如权利要求10所述的双凸极轴向磁通永磁电机,其特征在于,上述定子凸极围绕上述至少两个定子中的各定子均匀间隔开,并相对于上述对称轴线沿纵向成形。

30 12.如权利要求9所述的双凸极轴向磁通永磁电机,其特征在于,上述至少一个转子包括许多永磁体,该永磁体围绕上述至少一个转子均匀

间隔开并且在其间设置有由导磁材料制成的转子电磁凸极，每个上述转子电磁凸极具有第一和第二侧，上述永磁体极化成使得上述第一侧的磁性极化度与上述第二侧的相同。

5 13.如权利要求9所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述第一相包括串联的第一组线圈，上述第二相包括串联的第二组线圈。

14.如权利要求13所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述第一组线圈由上述至少两个定子中的一个定子支承，而上述第二组线圈由上述至少两个定子中的另一个定子支承。

15.一种双凸极轴向磁通永磁电机，它包括：

10 至少两个彼此共轴且沿横向配置的定子，上述至少两个定子中的每个定子均具有对称轴线和S个定子凸极，该数目S是等于或大于2的偶数，上述定子凸极围绕上述至少两个定子中的各定子均匀间隔开，上述定子凸极相对于上述对称轴线沿纵向成形；

15 配置在上述至少两个定子之间的至少一个转子，上述至少一个转子包括P个永磁体，P是等于或大于2的偶数，上述永磁体围绕上述至少一个转子均匀间隔开并且与R个用导磁材料制成的转子电磁凸极交替配置，该R是等于P的整数；和

20 具有第一相和第二相的绕组，上述绕组由上述至少两个定子支承，上述第一相包括串联的第一组线圈，而上述第二相包括串联的第二组线圈。

16.如权利要求15所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， $R = S$ 。

17.如权利要求15所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， $R = S + 2$ 。

25 18.如权利要求15所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， $R = S + X$ ，X是等于或大于4的偶数。

19.如权利要求15所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述第一组的线圈绕在上述至少两个定子中一个定子的定子凸极上，而上述第二组的线圈绕在上述至少两个定子中另一个定子的定子凸极上。

30 20.如权利要求15所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述第一组的线圈绕在上述至少两个定子中的两个定子的定子凸极

上，而上述第二组的线圈也绕在上述至少两个定子中的两个定子的定子凸极上。

21.如权利要求 20 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， R 是 10 的倍数并且 $S = R (4/5)$ 。

5 22.如权利要求 15 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述线圈包含铜，上述导磁材料包含钢，上述至少两个定子包含钢片叠层。

23.一种双凸极轴向磁通永磁电机，它包括：

至少三个彼此共轴且沿横向配置的定子；

10 至少两个插置在上述至少三个定子中的转子；和

包括第一相和第二相的绕组，上述绕组由上述至少三个定子支承。

24.如权利要求 23 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述至少三个定子形成第一横向定子、第二横向定子和中间定子，上述至少三个定子中的每个定子均具有 S 个定子凸极，该 S 是等于或大于 2
15 的偶数，上述第一相包括第一组线圈，上述第二相包括第二组线圈，上述第一组线圈绕在上述中间定子的定子凸极上，上述第二组线圈绕在上述第一横向和第二横向定子的定子凸极上。

25.如权利要求 24 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，上述至少两个转子中的每个转子均具有 P 个永磁体，该 P 是等于或大于
20 2 的偶数，上述永磁体与 R 个由导磁材料制成的转子电磁凸极交替配置，该 R 是等于 P 的整数。

26.如权利要求 25 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， $R = S$ 。

27.如权利要求 25 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于，
25 $R = S + 2$ 。

28.如权利要求 25 所述的双凸极轴向磁通永磁电机，其特征在于， $R = S + X$ ， X 是等于或大于 4 的偶数。

29.一种用于直接驱动风轮机的双凸极永磁电机，它包括：

至少两个彼此共轴配置的定子；

30 至少一个转子，它插置在上述至少两个定子之间且刚性地连接于风轮机转子上；和

两相绕组，该绕组由上述至少两个定子支承并通过电子换流器电连

接到公用电网上。

30.如权利要求 29 所述的双凸极永磁电机，其特征在于，上述电子换流器包括电连接到上述公用电网上的三相换流器和电连接到上述两相绕组上的两相换流器，上述三相换流器由直流线路连接于上述两相换流器。

5

说明书

双凸级永磁电机

发明背景

5 发明领域

本发明涉及低速发电机，具体涉及用于风轮机直接驱动的发电机。

相关技术描述

近年来风轮机作为对环境安全的而且相当廉价的替代能源已受到广泛注意。随着这种兴趣的增长，已进行了显著的努力来开发可靠且高
10 效率的风轮机。

风轮机一般包括具有多个叶片的转子。该转子水平装在一个机座内，该机座位于桁梁或单管塔的顶部。风轮机的叶片将风能转换为驱动一个或多个发电机的转动力，该发电机通过齿轮装置可转动地连接于该
15 转子。为了使发电机有效地将机械能转换为电能，必须用齿轮装置提升风轮机转子固有的低转速，产生的电能被馈送到公用电网上。

很多常规风轮机以恒定速度转动产生每秒 60 周 (60Hz) 的电能，该频率是美国交流电的标准。因为风速连续变化，所以这些风轮机必须具有保持转子速度恒定的系统。在一种这样的系统中，当风速增加时将叶片的叶距增加，而在风速减小时将叶片的叶距减小，由此使转子转速
20 保持恒定。

有些风轮机通过采用电力换流器调节其输出而变速工作。当风轮机转子的速度波动时，从发电机输出的交流电流的频率也发生改变。配置在发电机和公用电网之间的电力换流器将频率变化的交流电流转化为直流，然后再将直流转换成具有固定频率 60Hz 的交流电流。

25 风轮机必须结实和可靠。因为风轮机的齿轮装置价格贵、重量大、又要经常维修，所以很希望通过使发电机直接连接于风轮机转子而除去齿轮装置。风轮机直接驱动的优点是提高了可靠性、降低了成本、减小了重量、减小了工作噪声、提高了效率而且没有转矩限制。

然而，因为常规发电机不能在 30 ~ 50r/min 范围内的低转速下有效工作，所以将风轮机直接连接到发电机上也是有问题的。 Weh H.,
30 May H.和 Salaby M.在 Proc. ICEM, 1990 年第 3 卷 1040 ~ 1045 页的题

为“永磁激励同步电机的高效磁路”“(Highly Effective Magnetic Circuits for Permanent Magnet Excited Synchronous Machines) 的论文中公开了一种可用作低转子转速发电机的电机。

图 1 所示的这种横向磁通电机 (TF 电机) 包括环形转子 2 (图中仅示出其一部分)、固定的外侧电枢绕组 4、固定的内侧电枢绕组 6、多个外侧定子铁心磁通导向件 8 和多个内侧定子铁心磁通导向件 10。环形转子 2 包括第一列永磁体 12 和第二列永磁体 14。用非磁性材料例如纤维增强树脂做的环形件 16 被夹在两列永磁体之间。环形转子 2 构造成永磁体 12 和铁部件 18 交替布置, 永磁体 14 与铁部件 20 交替布置。

即使 TF 电机可以在低转子转速下工作, 但它也具有若干显著的缺点。具体是, TF 电机可能有相当大的槽口漏磁, 这对操作性能有负面影响。为弄清此问题的本质, 考虑 $P \equiv \Gamma \omega$ 这一关系, 式中

P = 电机的额定功率

Γ = 转矩

ω = 转子角速度

从上述关系中可以看出, 为在低的角速度 (ω) 下达到高的额定功率 (P), 必须尽量增大由电机产生的转矩 (Γ)。众所周知, 在这种技术中为获得高的转矩, 必须尽量增加电机的磁通量和电枢绕组 4 和 6 中的电流。为了承载绕组 4 和 6 中增加的电流而又不会因发热造成能量过分损失, 必须增加电枢绕组 4 和 6 的横截面积。

另外, 众所周知, 在这种技术中由电机产生的转矩正比于电机直径的平方 (或立方或大于 1 的幂数) 与电机长度之乘积。换言之:

$$\Gamma = kd^2L$$

式中, Γ = 转矩

k = 常数

L = 电机的有效材料长度

d = 电机的有效材料直径

上述关系表示, 为在紧凑装置中获得高的转矩, 最佳技术方案是增加电机直径而不是电机长度。在图 1 所示的先有技术系统中, 如果要增加 TF 电机的直径并保持长度不变, 则只有增加分别包含电枢绕组 4 和 6 的定子铁心磁通导向件 8 和 10 的槽口深度 D , 以便尽可能增大电枢绕组 4 和 6 的横截面积 (因为深度 D 是电机直径的函数), 而定子铁心磁

通导向件 8 和 10 的槽口宽度 W (该宽度是机器长度的函数) 必须保持不变。

图 2 示出, 当槽口深度 D 增加时, 槽口空气隙的横截面积 A_a 以及穿过例如钢制外部定子铁心磁通导向件 8 的磁路长度 L_s 也增加。而外部定子铁心磁通导向件 8 的横截面积 A_s 和穿过槽口空气隙的磁路长度 L_a 保持不变。因为磁阻 R (磁路对磁通量形成的阻力) 等于 $L/\mu A$, 式中

μ = 介质的导磁率

L = 磁路长度

10 A = 介质的横截面积

所以从图 2 可以明显看出, 当槽口深度 D 增加时, 通过钢制外部定子铁心磁通导向件 8 的磁阻增加, 而通过槽口空气间隙的磁阻减小。因此增加槽口深度 D 导致漏磁的增大, 因而磁链沿路径 L_a 穿过槽口空气间隙而不是沿着穿过外部定子铁心磁通导向件 8 中的路径 L_s 。任何沿路径 L_a 而不是沿路径 L_s 经槽口空隙漏出的磁力线没有链接位于槽口空气间隙中的绕组的所有线圈 (例如图 1 的绕组 4), 因而不能产生电机的额定转矩, 造成电机的额定功率减小。

TF 电机的另一缺点是, 由于两个定子 (即外部定子铁心磁通导向件 8 和内部定子铁心磁通导向件 10) 的非对称配置, 由外部电枢绕组 4 和内部电枢绕组 6 (图 1) 形成的磁阻是不同的, 造成两相之间的电磁不平衡。由图 3 可以看到 TF 电机电磁不平衡的原因。由外部定子铁心磁通导向件 8 与空气间隙 23 交替配置所形成的外部体积 22 大于由内部定子铁心磁通导向件 10 与空气间隙 25 交替配置所形成的内部体积 24。因为体积 22 和 24 内均包括相同数目的相同的钢制定子铁心磁通导向件, 而且外部体积 22 事实上大于内部体积 24, 所以在外部体积 22 中的钢与空气之比小于在内部体积 24 的。因此外部体积 22 与内部体积 24 相比, 对磁通具有更大的磁阻, 这造成外部电枢绕组 4 和内部电枢绕组 6 (图 3 中未示出) 的两相之间的磁不平衡。TF 电机两相之间的磁的不平衡导致产生热损耗的循环电流、可能损坏转子轴承的轴承电流和转子的不均匀负载, 这些造成电机的机械设计和电气设计中的困难。

另外, 已证明制造大型 TF 机 (很希望制造这种大型机, 因为磁极数目且由此电机尺寸的增加将改进它在低转子转速下的操作特性) 是一

项艰巨的任务，因为当这些部件的尺寸增大时，在环形转子 2 和外部与内部定子铁心磁通导向件 8 和 10 之间要保持小的如图 4 所示的空气间隙 26 和 28 是相当困难的。（众所周知，在这种技术中为获得最大功率和效率，必须尽量减小电机的活动部件和固定部件之间的空气间隙。）

5 另外，TF 电机不适合于高速操作，因为固定的外部定子铁心磁通导向件 8 和环形转子 2 的同心取向使得：当转子转速增加时，环形转子 2 的径向膨胀将逐渐减少空气间隙 26，直到环形转子 2 碰撞到外部定子铁心磁通导向件 8，这将造成 TF 电机的灾难性破坏。

10 另外，TF 电机成本相当高，因为制造包括外部、内部定子铁心磁通导向件 8、10 及电枢绕组 4、6 的复杂固定组件是相当困难的。TF 电机在其绕组中用了大量铜，这又增加了制造成本。在绕组中铜的利用率不高，因为仅在电枢绕组 4 和 6 的厚度为 T（图 4）的部分被用于形成转矩（因为绕组中仅有这些部分由磁力线链接）。厚度为 G（ $G>T$ ）的其余部分绕组的作用只是用以闭合电路。

15 TF 电机的另一缺点是，由于不存在通到内部的出入口，所以在机器操作期间在内部定子铁心磁通导向件 10 中产生的热量很难散发出去，这样便降低了效率和功率输出。

发明概述

20 因此要求提供一种双凸极永磁电机，该电机可以克服上述缺点，例如，可以尽量减小槽口磁漏、具有电磁平衡的绕组相、制造容易且成本低、可以在低速和高速下运转、有利于散热并具有紧凑和高效的结构。

还希望永磁电机在低角速度下获得高的功率密度、能够容纳数目多的磁极、可采用具有低电感系数绕线的常规绕组设计以及具有简单的支承结构。

25 研究以下的说明和附图可以明显看出本发明的其它优点。

30 在一个实施例中，本发明的双凸极轴向磁通永磁电机包括转子，该转子装在一对共轴且横向取向的定子之间。该转子用许多与钢制电磁凸极交替配置的永磁体制成。各个定子具有许多纵向取向的凸极。定子凸极支承两组多个铜线圈，其中在各个定子凸极上绕一个单一线圈。每组多个线圈串联，因此构成两相绕组。

附图简述

参考附图借助于不带有限定性的实施例例示出本发明，其中：

图 1 是先有技术的横向磁通电机（TF 电机）的透视图；
图 2 是图 1 先有技术 TF 电机的定子铁心磁通导向件的透视图；
图 3 是图 1 先有技术 TF 电机的侧视图；
图 4 是图 3 先有技术 TF 电机的细节图；
5 图 5 是按照本发明构造的双凸极轴向磁通永磁电机（DSAFPM 电机）之主要部件的分解透视图；
图 6 是图 5 所示 DSAFPM 电机转子的侧视示意图；
图 7 是透视图，示出图 5 所示定子的制造方法；
图 8 是按本发明构造的 DSAFPM 电机的部分截面透视图；
10 图 9 是图 8 所示 DSAFPM 电机线圈的透视图；
图 10 是具有不同长度端部绕组的图 8 线圈的透视图；
图 11 是示意图，示出适用于将图 8 所示 DSAFPM 电机连接于公用电网的换流器配置，其中 DSAFPM 电机连接于风轮机转子上；
图 12 是图 11 换流器配置的细节示意图；
15 图 13 是图 8 所示 DSAFPM 电机的等效电路；
图 14 是图表，示出图 8 所示的 DSAFPM 电机在正常速度下转矩的产生；
图 15 是图表，示出图 8 所示 DSAFPM 电机在高速度下转矩的产生；
20 图 16 是图 8 DSAFPM 电机的横截面图；
图 17 ~ 24 示出图 8 所示 DSAFPM 电机磁通分布的变化；
图 25 和 26 是对应于图 17 ~ 24 所示 DSAFPM 电机磁通分布变化的磁链曲线；
图 27 是双凸极轴向磁通永磁电机的示意图，其中各个定子包括 A
25 相和 B 相绕组的线圈；
图 28 是具有双转子结构的双凸极轴向磁通永磁电机的横截面图；
图 29 和 30 是示意图，示出图 28 所示电机的不同转子取向；
图 31 是本发明的双凸极径向磁通永磁电机的横截面图。
为了例示目的，这些图不一定按比例画出。在所有图中，相同部件
30 用相同编号表示。

发明详述

在以下的整个说明中，为更好地理解本发明，示出了一些具体的细

节。但是可以不用这些具体细节而实施本发明。在另外一些情况下，为避免不必要地混淆本发明而没有示出或说明公知的部件。因此说明和附图只是例示性质而没有限制性的意义。

5 图 5 示出本发明的双凸极轴向磁通永磁电机的主要部件。该电机包括第一定子 100、转子 102 和第二定子 104，它们均为环形。定子 100 和 104 具有外径 d ，它与转子 102 的外径相同。

10 转子 102 包括许多纵向的永磁体 106，例如稀土永磁体或铁氧体永磁体。永磁体 106 围绕转子 102 均匀间隔开并且与许多用导磁材料例如叠层钢制造的电磁转子凸极 108 交替配置，凸极数目与永磁体 106 相同。各个永磁体 106 具有径向尺寸 t 和角度 θ_m 。永磁体 106 在横向方向上被极化，使得转子凸极 108 在转子的两侧被完全一样地极化，如图 6 所示，该图示出磁力线 107 的取向。

15 定子 100（图 5）具有许多纵向定子凸极 110 和一个铁座（back iron）111。定子 104 具有许多纵向定子凸极 112 和一个铁座 113。定子凸极 110 和 112 围绕其相应定子 100 和 104 均匀间隔开。各个定子具有许多定子凸极，其数目等于转子凸极 108 的数目。每个定子凸极具有径向尺寸 t 和角度 θ_s 。

20 定子 100 和 104 分别包括许多独立的叠置钢片，这些定子采用卷绕和冲压叠层钢带的方法被廉价地制造，如图 7 所示。

25 图 8 是本发明的双凸极轴向磁通永磁电机的透视横截面图。电机的转子 102 刚性连接于主轴 114，该主轴又直接连接在风轮机的转子（未示出）上。主轴 114 被支承在圆筒机壳 116 内，该机壳具有端面 118 和 120。该轴 114 在轴承 122 和 124 中转动，该轴承分别居中地安装在端面 118 和 120 上。

30 定子 100 的铁座 111 刚性地固定于端面 118 的内侧表面上，而定子 104 的铁座 113 则刚性地固定于端面 120 的内侧表面上。定子 100 和 104 的这种配置使得在定子中由涡流和线圈电流产生的热量可以有效地经机壳 116 传导和对流散发到周围大气中。

35 定子 100 和 104 如此取向，使得当定子凸极 112 与永磁体 106 完全对准时，定子凸极 110 完全与转子凸极 108 对准，反之亦然。定子凸极 110 支承铜线圈 126，而定子凸极 112 支承铜线圈 128，其中各个线圈围绕各个定子凸极的周缘配置。线圈 126 和 128 具有常规形状和设计，

因此可以廉价且容易地制造，并且安装在由定子凸极 110 和 112 形成的槽口中。

如图 9 所示，线圈 128 包括端部绕组部分 E 和导体部分 C。端部绕组部分 E 的长度（不参与产生转矩）小于导体部分 C 的长度。线圈 126 和 128 的这种构形减少了线圈的电感系数（电感系数是电路的一种特性，电路中的变化电流通过电感系数产生变化的磁场，该变化的磁场又在同一电路或邻近的电路上产生感应电压），这对于换流器馈电电机是有利的，在这种电机中，电流由施加在电机端子上的脉宽调制电压控制。产生这种优点是由于低电感绕组可以快速动态控制电流，因为电流可以紧随着所施加的或产生的电压而没有显著的相滞后。另外，因为端部绕组部分 E 较小，所以绕组中铜可以得到有效应用，并且进一步降低了电机成本。线圈 126 和 128 还可以具有图 10 所示的构形，其中端部绕组 E1 和 E2 具有不同长度。

如图 11 所示，线圈 126 串联，构成 A 相绕组 133。线圈 128 也串联，构成 B 相绕组 135。A 相和 B 相绕组 133 和 135 连接于功率电子换流器 129，该换流器包括例如在 William L. Erdman 的美国专利 No.5225712 中说明的三相直流-交流换流器 134 以及双极两相换流器 136，该换流器 136 控制通过各相绕组沿两个方向的电流值。当风轮机转子 235 转动刚性连接于其上的轴 114 时便产生电流。换流器 134 电连接于公用电网 137 上，而换流器 136 则电连接到 A 相和 B 相绕组 133 和 135 上。换流器 134 和 136 由直流线路 138 相互连接。换流器 129 通过脉宽调制电压波形调制相电流。另外，换流器 129 还允许将电机用作电动机或用作发电机，并且还允许电机在保持恒电压恒频率连接于公用电网的同时进行电机的变电压变频操作。

图 12 是换流器 136 的示意图，它包括许多开关 137，例如隔离栅双极晶体管（IGBT）、许多单向二极管 139 和例如电池的电源 140。

可以应用双凸极轴向磁通永磁电机的基于有限元模型（FEM）分析提出的线性模型来研究电机的操作性能及其可能的控制方法。这种线性模型的假定如下：（1）电感对转子转角的变化是线性的；（2）电感系数与电流量无关。示于图 13 的双凸极轴向磁通永磁电机线性模型的等值电路推导如下：

$$u_a = e_{ma} + i_a \times r_a + \frac{d\lambda_a}{dt}$$

$$u_b = e_{mb} + i_b \times r_b + \frac{d\lambda_b}{dt}$$

式中

5 u_a = 相 A 的端电压;

u_b = 相 B 的端电压;

i_a = 相 A 的相电流;

i_b = 相 B 的相电流;

r_a = 相 A 的电阻;

10 r_b = 相 B 的电阻;

λ_a = 相 A 的电枢感应磁链;

λ_b = 相 B 的电枢感应磁链;

另外

$$15 \quad e_{ma} = \frac{d\psi_{ma}}{dt}$$

$$e_{mb} = \frac{d\psi_{mb}}{dt}$$

式中, ψ_{ma} = 由相 A 链接的永磁体磁通量

20 ψ_{mb} = 由相 B 链接的永磁体磁通量

而且:

$$\lambda_a = L_{aa} \times i_a + M_{ba} \times i_b$$

$$\lambda_b = M_{ab} \times i_a + L_{bb} \times i_b$$

式中

25 M_{ab} = 相 A 和相 B 之间的互感系数(由相 B 链接的磁通量除以相 A 的激励电流);

M_{ba} = 相 A 和相 B 之间的互感系数(由相 A 链接的磁通量除以相 B 的激励电流)。

由以上可得到:

$$30 \quad \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ba} \\ M_{ab} & L_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a + \omega \frac{dL_{aa}}{d\theta_r} & \omega \frac{dM_{ba}}{d\theta_r} \\ \omega \frac{dM_{ab}}{d\theta_r} & r_b + \omega \frac{dL_{bb}}{d\theta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{ma} \\ e_{mb} \end{bmatrix}$$

式中 q_r = 转子转动的机械角度

w_r = 转子角速度

这组方程示意于图 13，其中采用以下定义：

e_{ma} = 由永磁体磁通量变化产生的相 A 的感应电压；

5 e_{mb} = 由永磁体磁通量变化产生的相 B 的感应电压；

e_{ra} = 由相 A 自感系数变化产生的相 A 的磁阻电压；

e_{rb} = 由相 B 自感系数变化产生的相 B 的磁阻电压；

e_{rma} = 由相 A 和相 B 之间互感系数的变化产生的相 A 的磁阻电压；

e_{rmb} = 由相 A 和相 B 之间互感系数的变化产生的相 B 的磁阻电压；

10 L_{aa} = 相 A 的自感系数；

L_{bb} = 相 B 的自感系数；

M_{ab} = 相 A 和相 B 之间的互感系数。

转矩由下式给出：

$$e_{ma} \times i_a + e_{mb} \times i_b = \omega_r (T_{ma} + T_{mb})$$

15

式中

$$T_{ma} = i_a \times \frac{d\Psi_{ma}}{d\theta_r} = \text{由相 A 产生的机械转矩}$$

$$T_{mb} = i_b \times \frac{d\Psi_{mb}}{d\theta_r} = \text{由相 B 产生的机械转矩。}$$

20

在正常操作条件下，相 A 和相 B 的自磁阻转矩将彼此抵消，如图 14 所示。互磁阻转矩为零平均值。磁阻转矩峰值较小，因为由于双凸极轴向磁通永磁电机具有的双空气间隙结构导致互感系数的变化相当小。所以产生的转矩很平滑。

25 当电机的操作速度高于额定值时，可以用自磁阻转矩借助于图 15 所示的控制方法来补偿由于不规则电流波形引起的功率损失。因此，双凸极轴向磁通永磁电机的操作速度能够高于已知的永磁电机。在高速时，互磁阻仍导致零平均转矩。

30 如果按下式定义 λ_a 和 λ_b 则可得到双凸极轴向磁通永磁电机的非线性模型：

$$\lambda_a = f(\theta_r, i_a, i_b)$$

$$\lambda_b = f(\theta_r, i_a, i_b)$$

因为定子 100 和 104 以同样方式成形, 所以由相 A 绕组和相 B 绕组得到的磁阻是相等的, 因而在两相之间形成电磁平衡。两相之电磁平衡的有利之处在于在理论上可以消除循环电流、轴承电流和转子上的不均匀负载, 因此增加了电机的效率和可靠性。

5 如图 16 所示, 在转子 102 和定子 100 的凸极 110 (其轮廓用虚线表示) 之间存在空气间隙 130。在转子 102 和定子凸极 112 之间也同样存在空气间隙 132, 其宽度与空气间隙 130 的宽度相等。众所周知, 尽量减小电机转子和定子之间的空气间隙可以增加功率和效率。定子 100、转子 102 和定子 104 的轴向构形允许形成较小的空气间隙 130 和
10 132, 而不管转子 102、定子 100 和 104 的尺寸如何, 因而降低了制造大型电机的成本。这种机器可以容纳许多凸极, 从而使它在低转子转速下具有高的输出。另外, 由于上述轴向构形, 所以转子 102 在高转子速度下的径向膨胀没有减小空气间隙 130 和 132, 这一点, 再加上转子 102 的平滑形状减小了空气阻力 (空气摩擦损失), 这一事实构成了高速操作能力的另一优点。
15

另外, 双凸极轴向磁通永磁电机的槽口漏磁被减小到最小, 因为为了产生高转矩, 增大线圈 126 和 128 的宽度 W_c 而没有增加槽口深度 D_s 。如本说明书前一部分中所详细说明的那样, 尽量减小槽口深度 D_s 将会减小槽口漏磁。

20 图 17 至 24 中例示出本发明上述实施例的操作。当转子凸极 108 完全与定子凸极 110 对准时, 永磁体 106 完全与定子凸极 112 (图 17) 对齐。转子 102 的这种取向 (相当于转子转动 0° 角) 使永磁体 106 产生的所有磁链 127 均穿过定子 100 的 A 相绕组 (图 17 中未示出)。在此时没有任何磁链穿过定子 104 的 B 相绕组 (图 17 未示出)。

25 当转子 102 转过 22.5° 角 (图 18) 时, 凸极 110 和 112 与转子 102 的电磁凸极 108 部分对齐, 因而由永磁体 106 产生的磁链 127 等地分布在定子 100 和定子 104 之间。在此时, 穿过 A 相绕组 (图 18 未示出) 的磁力线等于穿过 B 相绕组 (图 18 未示出) 的磁力线。

30 在转子 102 转过 45° 时 (图 19), 定子凸极 110 完全与永磁体 106 对齐, 而定子凸极 112 完全与转子电磁凸极 108 对齐。在转子 102 的这种取向时, 由永磁体 106 产生的所有磁链均穿过定子 104 的 B 相绕组 (图 19 未示出)。

在图 20、21、22、23 和 24 中分别示出转子 102 转动到 67.5°、90°、112.5°、135°和 157.5°时的磁通分布。在图 25 和 26 中分别示出对应于 0 ~ 180°机械转动角度的穿过 A 相和 B 相绕组的磁链 127 的曲线。双凸极轴向磁通永磁电机 A 相电流和 B 相电流之间的相位移是 90°电角度。

因此提供了一种永磁电极，该电极克服了上述缺点，例如尽量减小了槽口漏磁、具有电磁平衡的相、制造简便且成本低、能够在低速和高速两个速度下运转、容易散热、而且结构紧凑且效率高。

双凸极轴向磁通永磁电极因其能在低角速度下达到高的能量密度、能够容纳数目多的凸级、可以利用常规的具有低电感绕组的绕组结构、且只需采用简单的支承结构而表现出很大的优越性。

还可以提供所述设备的很多其它变形，在此将描述其中的一些。例如，双凸极轴向磁通永磁电极的定子凸极数目可以为大于 2 的任何偶数。另外，定子凸极（例如定子 100 的）与转子凸极之比不要求为 1:1。根据电机尺寸，该比值可以按以下公式改变：

$$R = S + 2$$

式中

S = 定子凸极数目

R = 转子凸极数目

其次，也可以提出其它合适的定子/转子凸极配置，例如，两个定子凸极可以与任何其它大于 4 的偶数个转子凸极相组合，例如 2/6、2/8 …… 2/100 等。还可以形成其它的组合，例如 4/8、4/10、4/12 ……；6/10、6/12、6/14 ……，等等。

另外，A 相和 B 相绕组的线圈可以配置成使得各个定子既包括 A 相的线圈也包括 B 相的线圈。图 27 示意出具有六极转子 150、第一双构件定子 152 和第二双构件定子 156 的双凸极轴向磁通永磁电机。转子 150 包括永磁体 155 和电磁凸极 157。定子 152 包括具有凸极 151 的 A 相构件 160 和具有凸极 153 的 B 相构件 162。定子 156 包括具有凸极 154 的 B 相构件 164 和具有凸极 158 的 A 相构件 168。A 相构件 160 和 168 的凸极支承串联的包括 A 相绕组的线圈 170。B 相构件 162 和 164 的凸极支承串联的包括 B 相绕组的线圈 172。在图 27 中，转子 150 相对于定子 152 和 156 的取向使得由永磁体 155 产生的所有磁链穿过 A 相绕组

的线圈 170。此实施例的另一种布局方法是，在转子电磁凸极的数目 R 是 10 的整倍数时，定子凸极 S 的数目按公式 $S = R(4/5)$ 进行计算。

图 28 示出具有双转子结构的双凸极轴向磁通永磁电机。该电机包括第一定子 200、第一转子 202、第二定子 204、第二转子 206 和第三定子 208，它们均为环形。定子 200、204 和 208 分别包括铁座 210、212 和 214。定子 200 具有许多纵向的定子凸极 216，定子 208 具有许多纵向的定子凸极 218。凸极 216 和 218 围绕其相应定子 200 和 208 均匀间隔开。定子 204 具有两排并列的纵向凸极 220 (a) 和 220 (b)，其中凸极 220 (a) 和 220 (b) 围绕定子 204 均匀间隔开。

许多铜线圈 222、224 (a)、224 (b) 和 226 相应连接，使得线圈 222 和 226 构成 A 相绕组，而线圈 224 (a) 和 (b) 构成 B 相绕组。线圈 222 和 226 配置在定子凸极 216 和 218 上，而线圈 224 (a) 和 (b) 配置在定子凸极 220 (a) 和 (b) 上。

图 29 示出，转子 202 和 206 由分别与多个转子电磁凸极 207 和 209 交替配置的多个纵向永久磁体 203 和 205 构成，该转子电磁凸极分别由叠层钢制成。间隙 $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 和 $G4$ 分别分开定子 200 和转子 202、转子 202 和定子 204、定子 204 和转子 206，以及转子 206 和定子 208。

如图 28 所示，转子 202 和 206 用例如螺纹紧固件 230 和 231 刚性固定在转子支承件 228 上。转子支承件 228 用焊接（未示出）固定于主轴 232 上。主轴 232 可转动地支承在具有端面 236、238 和筒体 240 的机壳 234 内，并且可以直接连接于例如风轮机的转子 235 上。定子 200 和 208 分别用例如螺纹紧固件 242 和 244 刚性固定在端面 236 和 238 上。定子 204 用例如螺纹紧固件 246 刚性固定在筒体 240 上。

在定子凸极的数目等于转子电磁凸极数目（图 29）的情况下，定子 200、204 和 208 的取向使得当凸极 207 和 209 与定子 204 的凸极 220 完全对准时，永磁体 203 便完全与凸极 216 对齐，并且永磁体 205 完全与凸极 218 对齐。转子 202 和 206 的这种取向使得由永磁体 203 和 205 产生的磁链 127 穿过 B 相绕组的线圈 224 (a) 和 (b)（图 28 中未示出）。同样，当永磁体 203 和 205 完全与凸极 220 对齐（图 30）时，凸极 207 和 209 便分别与凸极 216 和 218 完全对齐。转子 202 和 206 的这种取向使得由永磁体 203 和 205 产生的磁链 127 完全穿过 A 相绕组的线圈 222 和 226（图 30 中未示出）。

双凸极轴向磁通永磁电机不限于单转子或双转子结构。还可以采用三个或更多个转子，并且转子凸极与定子凸极之比也可以不同。

另外，还可形成如图 31 所示的径向磁通形式的双凸极永磁电机。这种电机包括外部定子 300 以及与外部定子 300 同心的内部定子 302。定子 300 包括许多径向等间隔配置的面向内的凸极 304。绕在凸极 304 上且串联的许多铜线圈 306 构成 A 相绕组。定子 302 包括许多径向等距间隔开的面向外的凸极 308。绕在凸极 308 上且串联的许多铜线圈 310 构成 B 相绕组。定子 300 和 302 分别具有座铁 312 和 314。

同心的转子 316 位于外部定子 300 和内部定子 302 之间。转子 316 包括许多永磁体 318，该永磁体与相等数目的由例如叠层钢制成的转子电磁凸极 320 交替配置。永磁体围绕转子 316 均匀间隔开，其数目等于凸极 304 和 308 的数目。转子 316 可直接连接于风轮机转子（未示出）上。本发明此实施例的操作原理与上述双凸极轴向磁通永磁电机的原理相同。

如同本发明的轴向磁通实施例那样，转子凸极数目和定子凸极数目之间的关系可以改变。另外，这种电机的线圈不一定连接成使得一个定子的线圈构成 A 相绕组而另一定子的线圈构成 B 相绕组。

上述双凸极永磁电机的构形仅仅是示例性的。因此，本发明的范围不应当由这些所示的例子确定，而应当由所附属的权利要求书和其等同物确定。

说明书附图

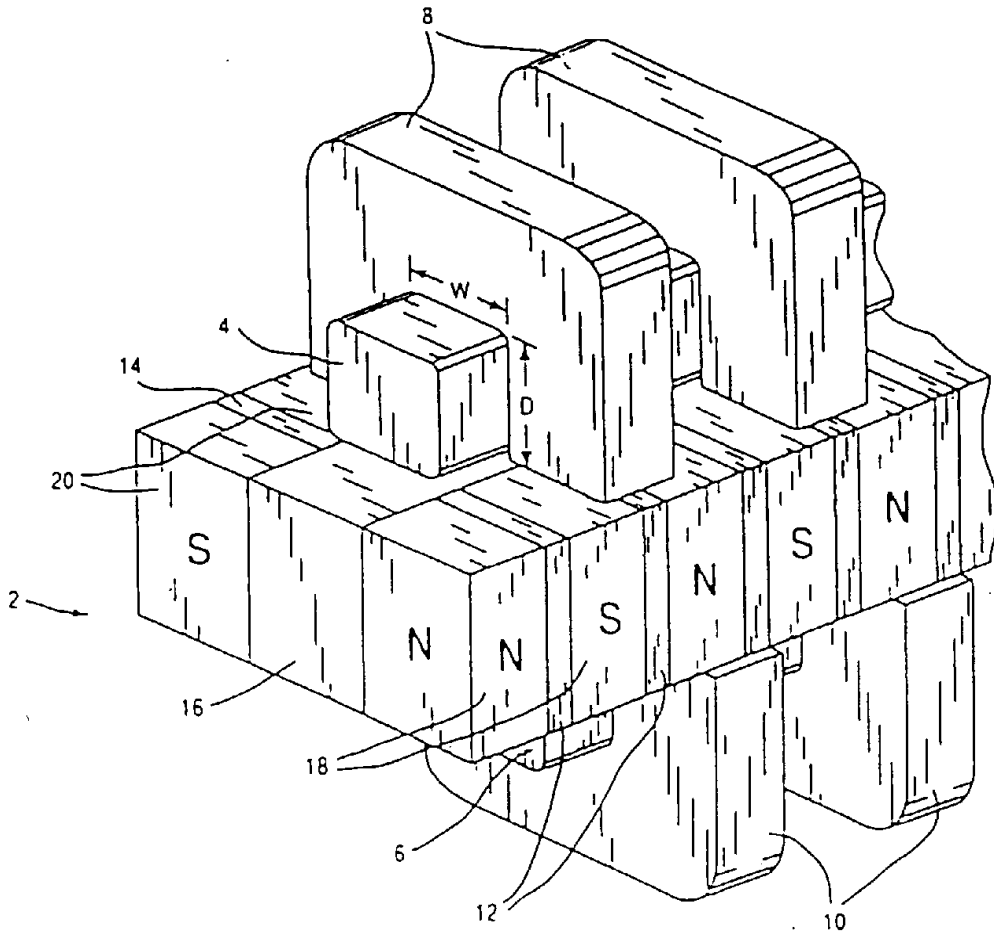


图 1 (先有技术)

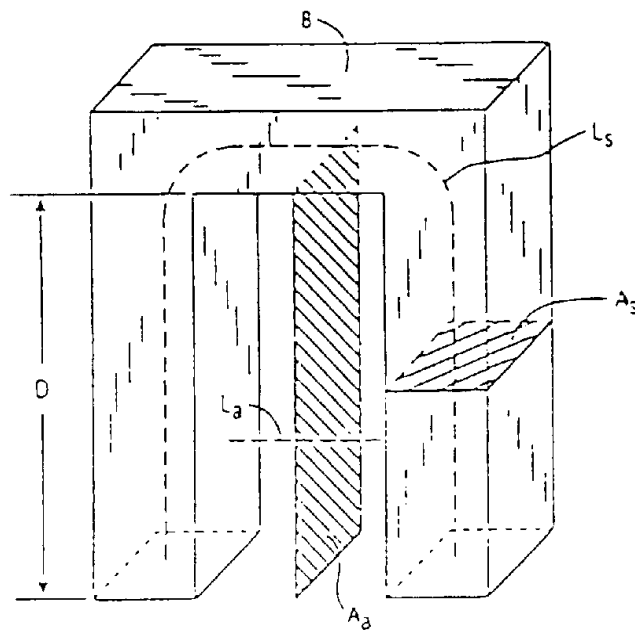


图 2 (先有技术)

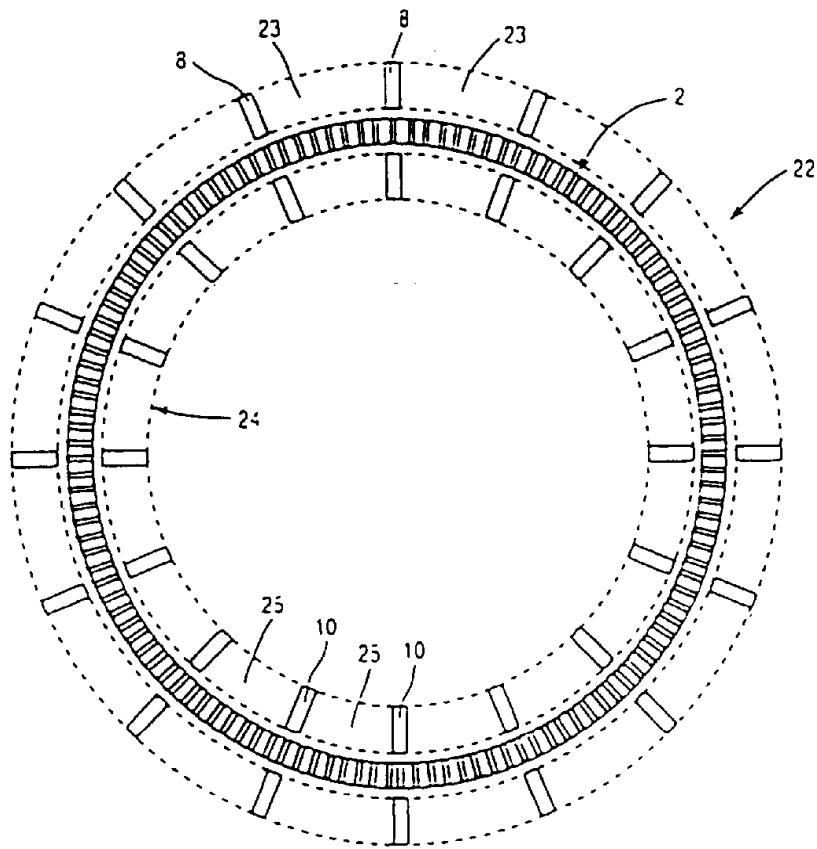


图 3 (现有技术)

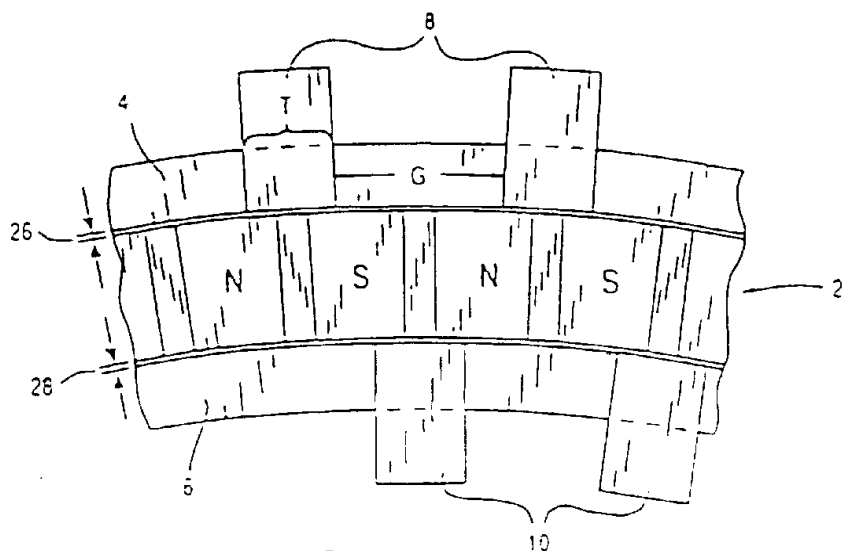


图 4 (现有技术)

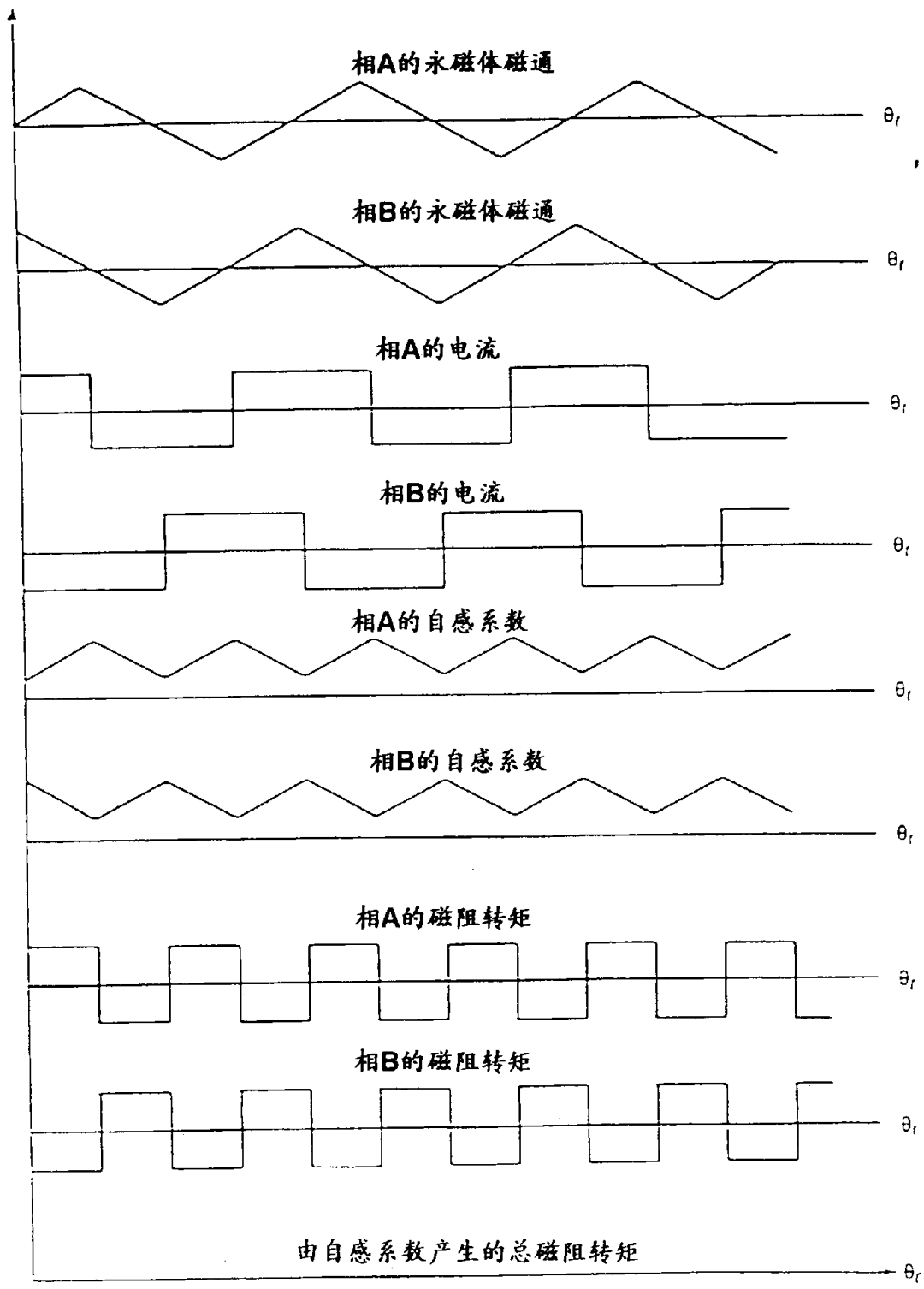


图14

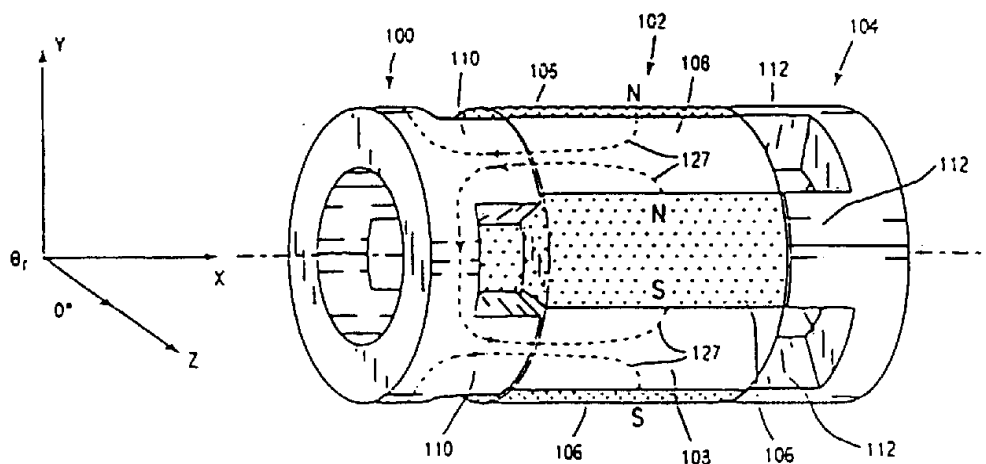


图 17

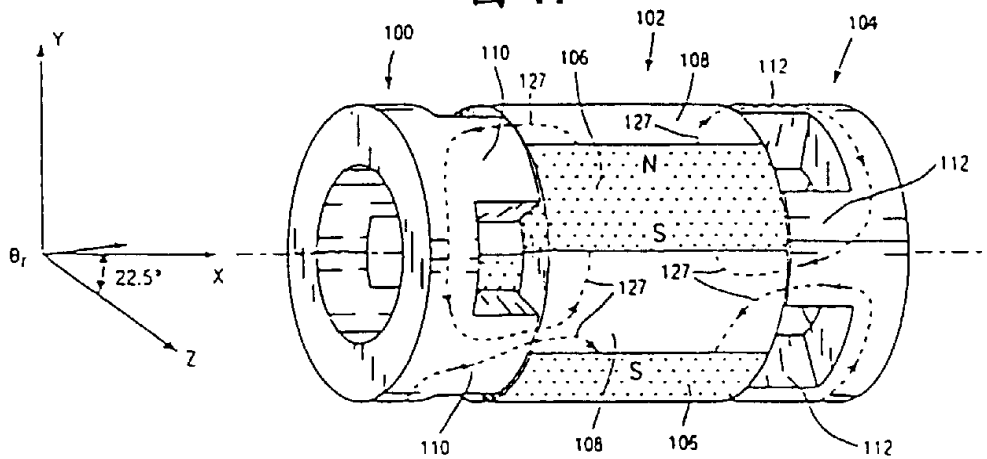


图 18

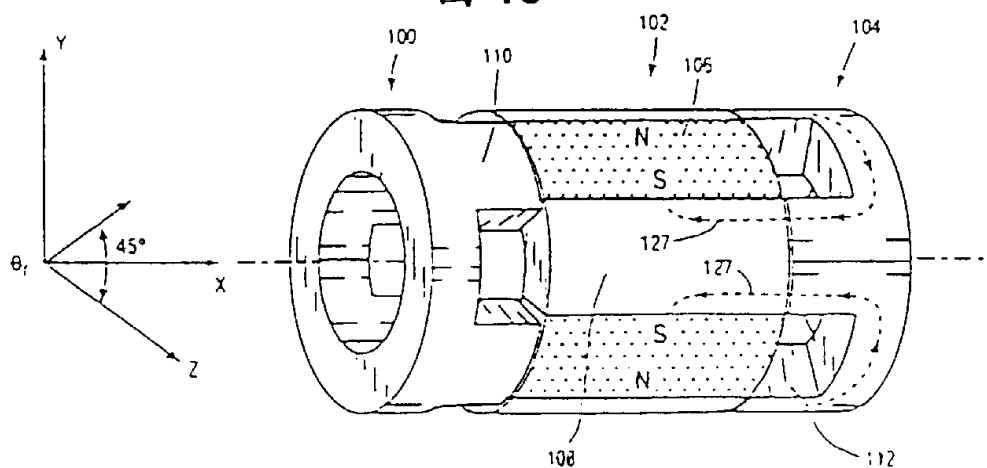


图 19

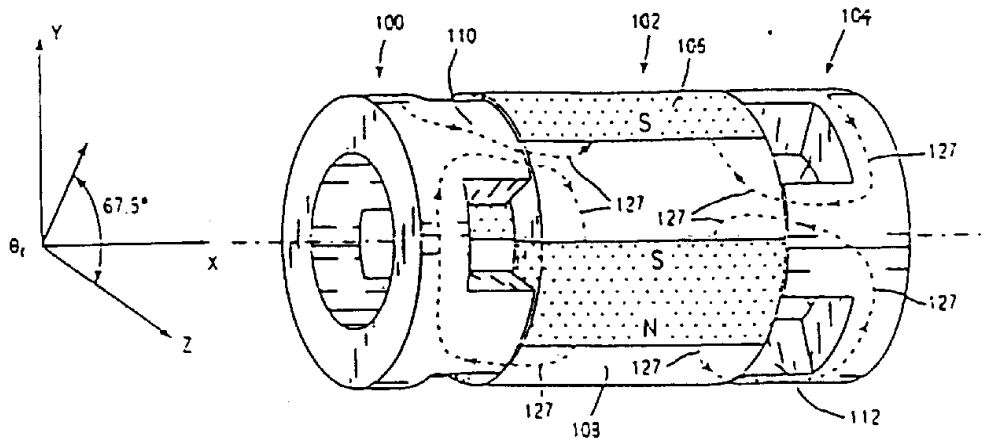


图 20

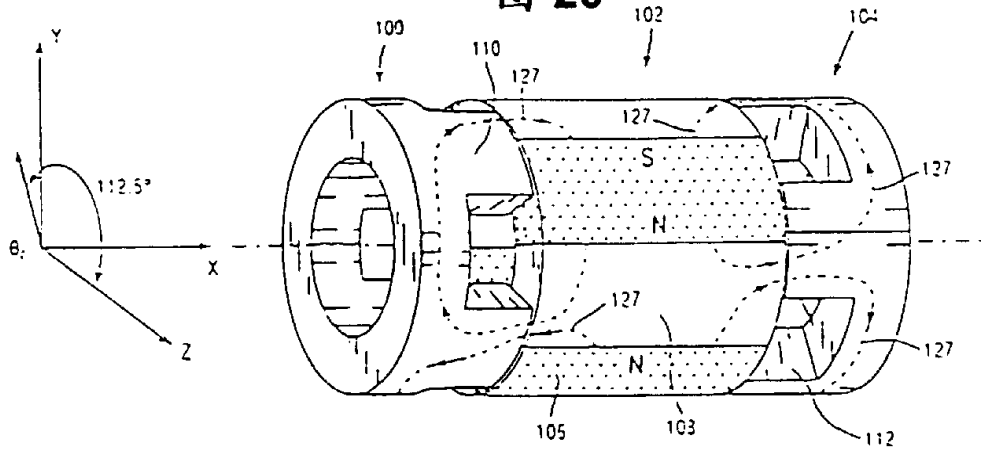


图 21

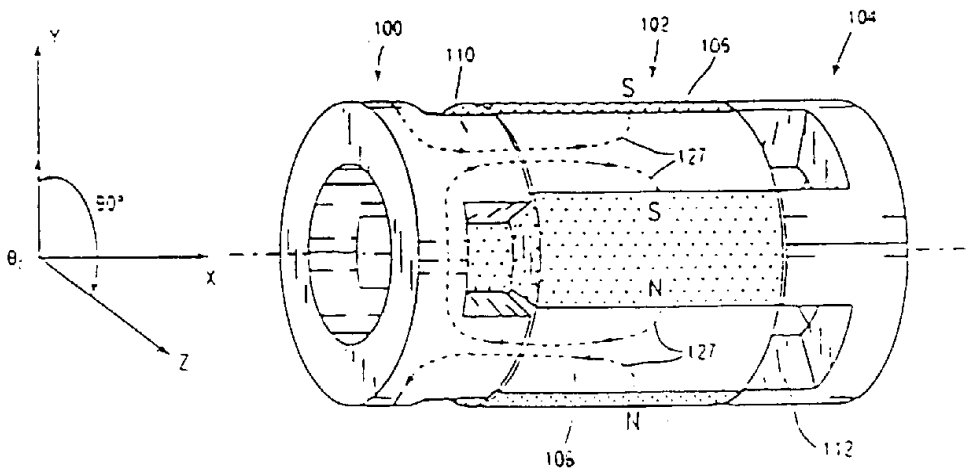


图 22

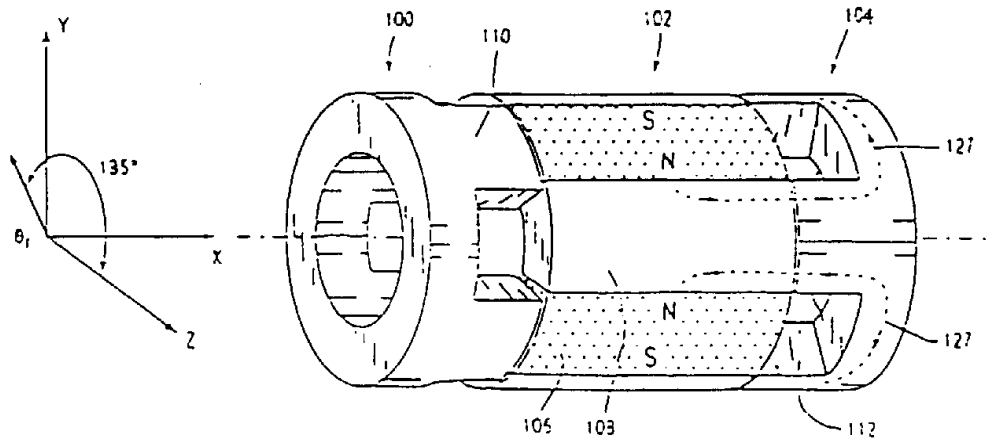


图 23

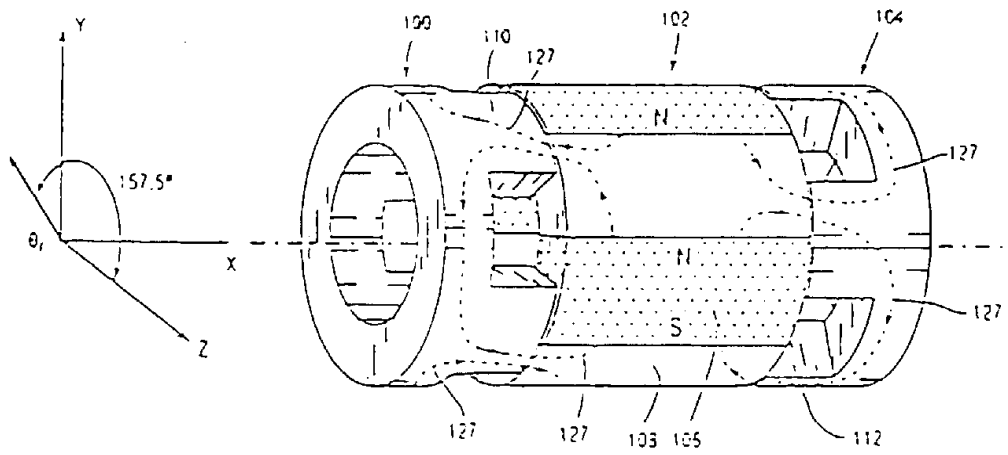


图 24

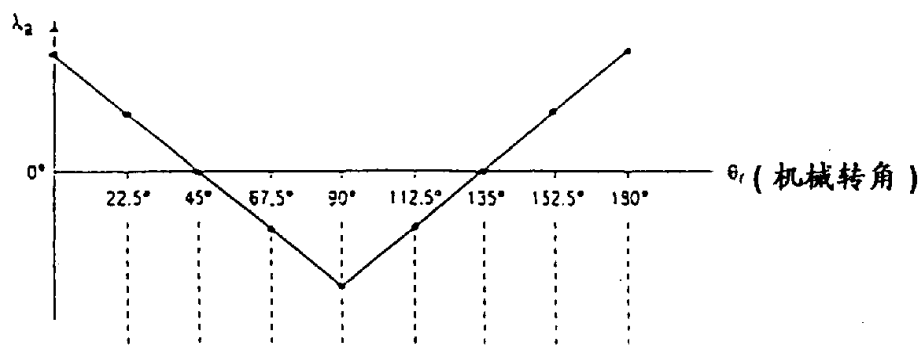


图 25

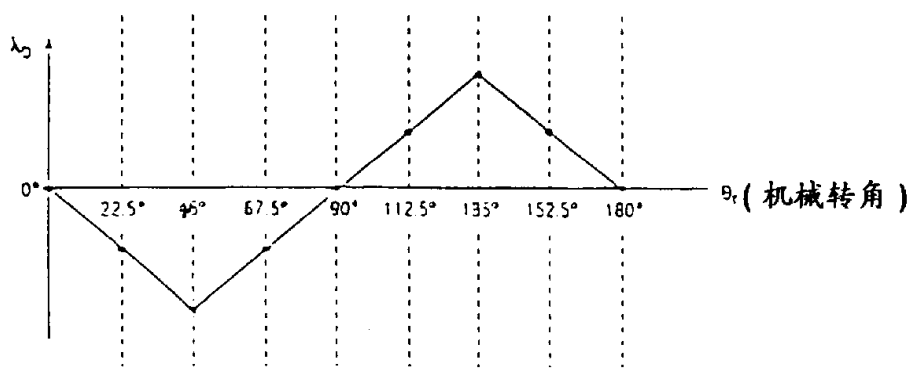


图 26

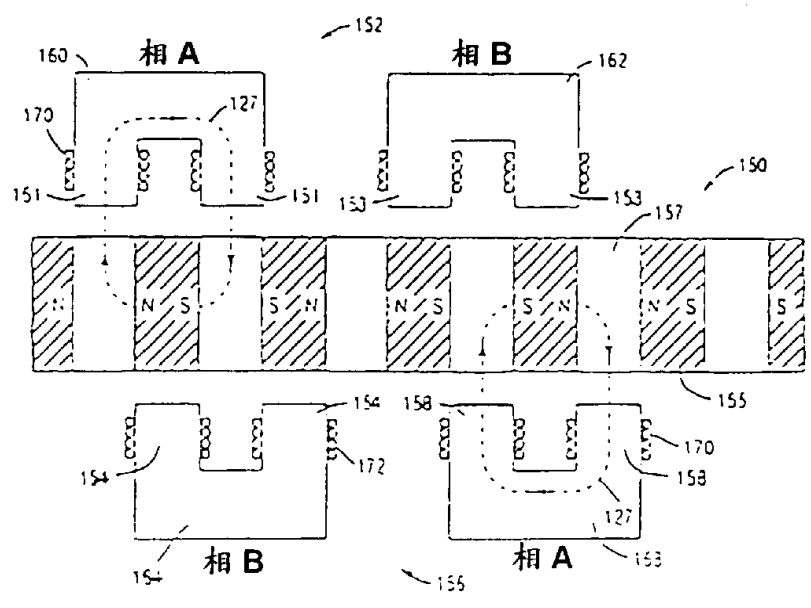


图 27

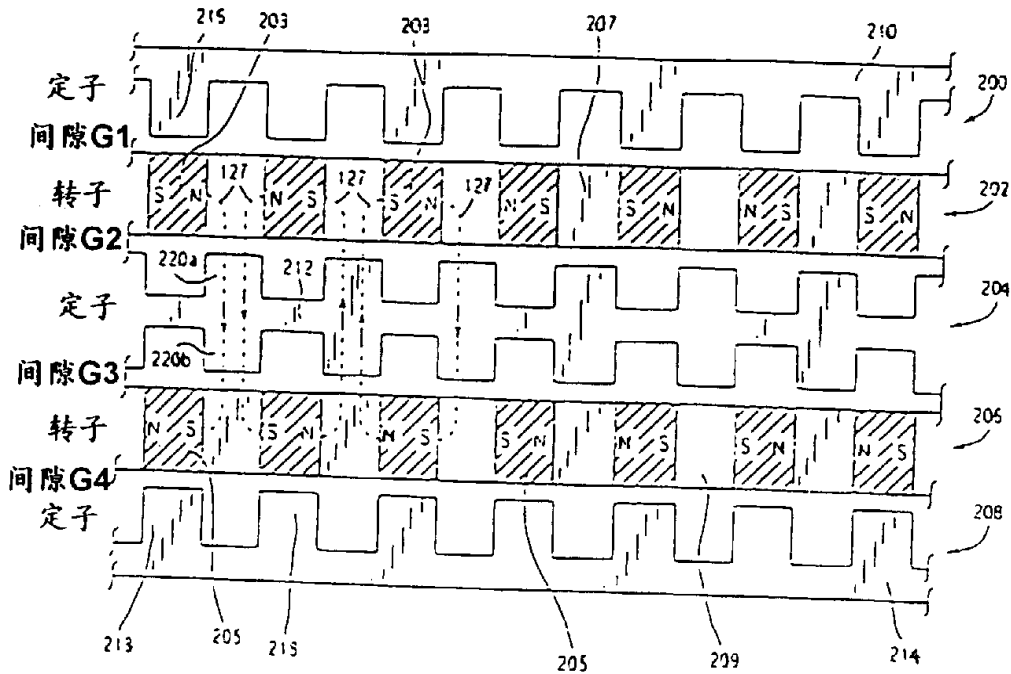


图 29

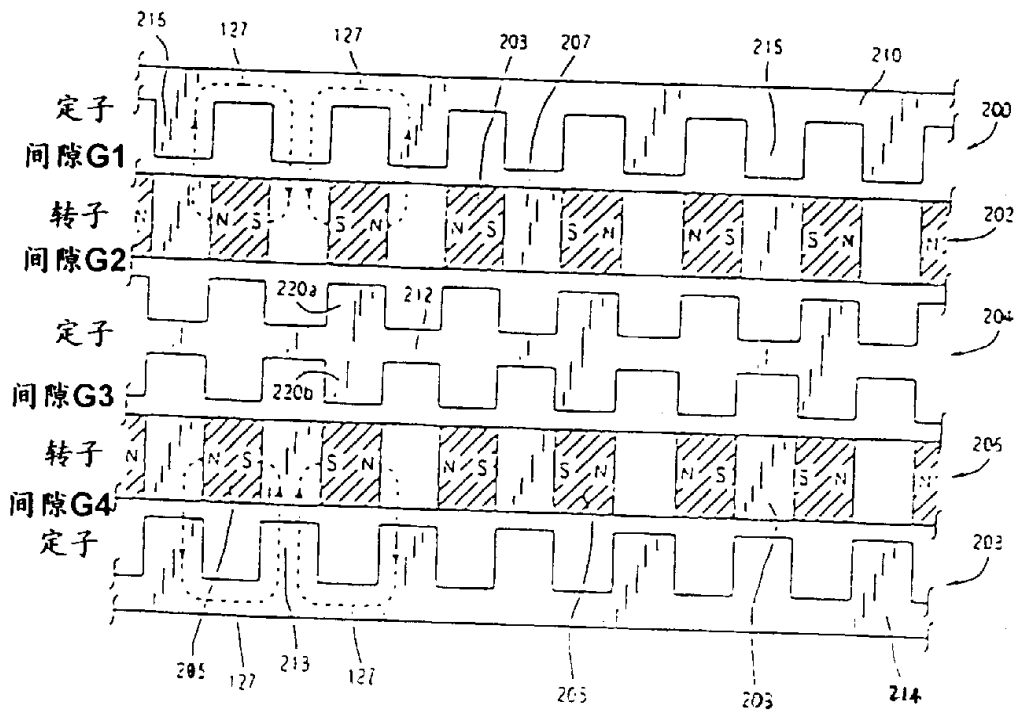


图 30

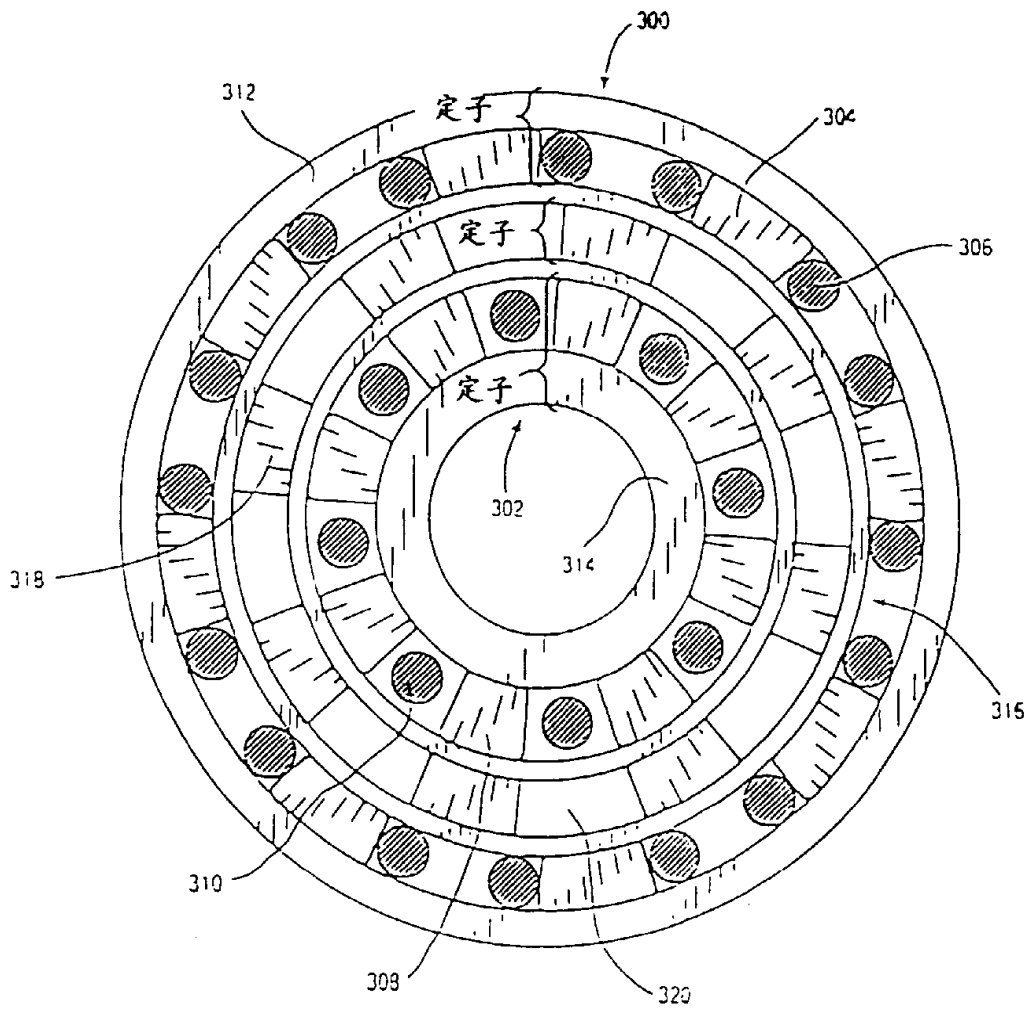


图 31