(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101485068 B
(45)授权公告日 2012.07.04

(21)申请号 200780023491.X

(22)申请日 2007.04.23

(30)优先权数据
0607994.1 2006.04.24 GB

(85)PCT申请进入国家阶段日
2008.12.23

(86)PCT申请的申请数据
PCT/GB2007/001456 2007.04.23

(87)PCT申请的公布数据
WO2007/125284 EN 2007.11.08

(73)专利权人 马格诺麦克斯有限公司
地址 英国谢菲尔德

(72)发明人 凯斯·阿塔拉 吉安·杰夫·雷恩斯

(74)专利代理机构 北京金思港知识产权代理有限公司 11349
代理人 邵毓琴

(51)Int.Cl.
H02K 16/02(2006.01)

(56)对比文件
EP 0945963 A2,1999.09.29, 说明书第0008-0028段及附图1.

EP 1353436 A2,2003.10.15, 说明书第0004、0028段和权利要求1-2、11-12及附图2和5.

EP 1353436 A2,2003.10.15, 说明书第0004、0028段和权利要求1-2、11-12及附图2和5.

EP 0945963 A2,1999.09.29, 说明书第0008-0028段及附图1.

CN 1284211 A,2001.02.14, 说明书第13页第8-12行及附图5.

审查员 李娜

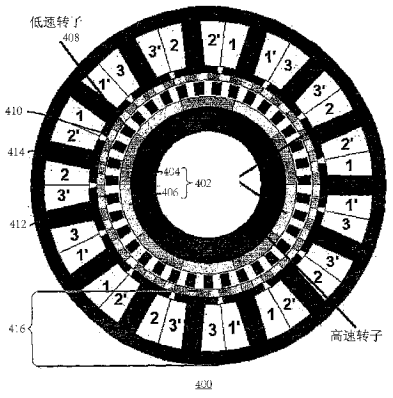
权利要求书 1 页 说明书 26 页 附图 9 页

(54)发明名称

电机

(57)摘要

一些实施例提供一种电机，其承载具有不同极—对数的第一和第二多个永久磁铁、启动使所述多个永久磁铁之间磁性相互作用的多个极靴以及与所述第一多个永久磁铁的第一/基本谐波耦合以启动电机能量转换的绕组。



CN 101485068 B

1. 一种电机，包括以磁性啮合方式相互作用的第一 (502) 和第二可移动元件 (506) ；以及布置成与和所述第一可移动元件 (502) 相关联的第一多个永久磁铁 (504) 的磁场的第一或基本谐波相互作用的绕组 (514)，其中所述第二可移动元件包括多个极靴 (508)，所述多个极靴 (508) 用于调制所述第一多个永久磁铁 (504) 和第二多个永久磁铁 (510) 中的至少一个的磁场以便使所述第一多个永久磁铁和所述第二多个永久磁铁之间能够磁耦合，并且其中所述绕组 (514) 安装在静止电枢 (512) 上，所述静止电枢支承所述第二多个永久磁铁 (510)。

2. 如权利要求 1 所述的电机，其中所述第一可移动元件布置在所述第二可移动元件的内侧。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的电机，其中可操作所述绕组以接收电流而产生与所述第一多个永久磁铁 (504) 的所述基本谐波的所述相互作用。

4. 如权利要求 1 或 2 所述的电机，其中可操作所述绕组以响应于与所述第一多个永久磁铁 (504) 的基本谐波的相互作用而发电。

5. 如权利要求 1 或 2 所述的电机，其中所述第一和第二可移动元件是可线性地移动的平移器。

6. 如权利要求 1 或 2 所述的电机，其中所述第一和第二可移动元件是可转动的转子。

7. 一种操作电机的方法，包括下列步骤：通过调制与第一可移动元件和第一多个永久磁铁相关联的磁场来产生所述电机的第一和第二可移动元件之间的磁性激发的啮合相互作用，所述第一可移动元件和第一多个永久磁体相关联；以及使布置成与和所述第一可移动元件相关联的所述磁场相互作用的绕组通电，其中调制与所述第一可移动元件相关联的磁场包括移动所述第二可移动元件，所述第二可移动元件包括多个极靴，所述多个极靴用于调制所述第一多个永久磁铁和第二多个永久磁铁中的至少一个的磁场以便使所述第一多个永久磁铁和所述第二多个永久磁铁之间能够磁耦合，并且其中所述绕组安装在静止电枢 (512) 上，所述静止电枢支承所述第二多个永久磁铁 (510)。

8. 如权利要求 7 所述的方法，其中所述绕组布置成与所述第一可移动元件相关联的磁场的第一或基本谐波相互作用。

9. 一种使用如权利要求 1 所述的电机的发电方法，包括下列步骤：移动至少所述第二可移动元件以引发所述第一可移动元件的运动而导致与所述第一可移动元件相关联的磁场的第一或基本谐波和所述绕组之间的磁性相互作用。

电机

技术领域

[0001] 本发明涉及电机。

[0002] 背景技术

[0003] 广泛地使用机械齿轮箱来使原动机 (prime-mover) 的工作速度与它们的负载要求匹配，以便增加，诸如例如，风力发电机的旋转速度，或减小，诸如例如，电气 - 船舶推进装置的旋转速度。使用高速电机连同机械齿轮箱来得到必需的速度和转矩特性通常会是成本更高和重量有效的。然而，如此的高速电机连同机械齿轮箱允许实现高的系统转矩密度，这种机械齿轮箱通常要求润滑和冷却。此外，可靠性也是一个重大的问题。结果，在不能够使用机械齿轮箱的一些应用中就使用直接驱动电机。

[0004] 存在多种直接驱动电机布局。一种如此的布局是已知能提供最高转矩 / 力密度的永久磁铁旋转 / 线性单极 (横向磁场) 电机 (TFM)。旋转横向磁场电机 (TFM) 具有范围为 40-60kNm/m^3 的转矩密度。然而，单极电机具有数量级为 0.3-0.45 的固有的较差的功率因数，这使它们不适宜用来发电。此外，对于马达应用，它们需要显著的更高的转换器伏 - 安额定值。

[0005] 本发明的一些实施例的目的在于至少减轻现有技术一些问题中的一个或多个问题。

[0006] 发明内容

[0007] 因此，本发明的一些实施例的第一方面提供一种电机，该电机包括内可移动元件以及外可移动元件，所述内可移动元件与外可移动元件布置成经由与所述内可移动元件相关联的多个永久磁铁按磁性啮合方式相互作用；以及相对于至少所述内可移动元件向外设置的绕组，其布置成与所述内可移动元件相关联的所述多个永久磁铁的所述磁场的所述基本谐波相互磁性作用。

[0008] 本发明的一些实施例的第二方面提供一种电机，该电机包括第一可移动元件以及第二可移动元件，所述第一可移动元件以及第二可移动元件设置成经由所述第一和第二多个永久磁铁的异步谐波以磁性齿轮的方式相互作用；以及布置成与所述第一可移动元件相关联的所述第一多个永久磁铁的所述磁场的所述基本谐波相互磁性作用的绕组。

[0009] 本发明的一些实施例的第三方面提供一种操作电机的方法，包括下列步骤：通过调制与所述第一可移动元件相关联的磁场来产生所述电机的第一和第二可移动元件之间的磁性激发啮合相互作用；以及使布置成以与所述第一可移动元件相关联的所述磁场相互作用的绕组通电。

[0010] 本发明的一些实施例的第四方面提供一种电机，该电机包括以磁性啮合方式相互作用的第一和第二可移动元件；以及布置成与所述第一可移动元件相关联的所述第一多个永久磁铁的磁场的第一 / 基本谐波相互作用的绕组。

[0011] 有利地，根据本发明的一些实施例的电气机器或电机具有远远大于传统高性能旋转 / 线性电机的高转矩和 / 或力密度，，并且至少与单极机或横向磁场电机一样高。然而，不像单极机或 TFM 那样，本发明的一些实施例具有相对高的功率因数。一些实施例具有 0.9

或更高的功率因数。

[0012] 附图说明

[0013] 现在将参考附图描述仅作为例子的本发明的一些实施例，在附图中：

[0014] 图 1 示意性地描绘已知的旋转磁性齿轮；

[0015] 图 2 示出与图 1 的组件相关联的磁谐波；

[0016] 图 3 示意性地示出包括与磁性齿轮组合的发电机的现有技术组件；

[0017] 图 4 示意性地描绘根据一个实施例的组合的电机和磁性齿轮；

[0018] 图 5 描绘根据一个较佳实施例的组合的电机和磁性齿轮；

[0019] 图 6 示出图 5 的电机的轴向截面图；

[0020] 图 7 示出与图 5 和图 6 的组合的电机和磁性齿轮相关联的磁谐波；

[0021] 图 8 示出根据再又一个实施例的电机；以及

[0022] 图 9 示出与图 8 的组合的电机和磁性齿轮相关联的磁谐波。

[0023] 具体实施方式

[0024] 图 1 示出旋转磁性齿轮 100，它包括第一或内转子 102、第二或外转子 104 以及已知为干扰或干扰装置的许多极靴 106。第一转子 102 包括承载各个第一数量的永久磁铁 110 的支撑 108。在所示的磁性齿轮中，第一转子 102 包括布置成产生空间变化磁场的 8 个永久磁铁或 4 个极－对。第二转子 104 包括承载各个第二数量的永久磁铁 114 的支撑 112。所示的第二转子 104 包括布置成产生空间变化磁场的 46 个永久磁铁或 23 个极－对。永久磁铁的第一和第二数量是不同的。因此，在永久磁铁 112 和 114 之间会存在小的或无用的磁场耦合或相互作用，以致一个转子的旋转不会导致另一个转子的旋转。

[0025] 使用极靴 106 以允许永久磁铁 110 和 114 的磁场相互作用。极靴 106 调制永久磁铁 110 和 114 的磁场，所以它们相互作用到一个转子的旋转会感应另一个转子以啮合的方式旋转的程度。以速度 ω_1 旋转的第一转子的旋转会感应以速度 ω_2 旋转的第二转子的旋转，其中 $\omega_1 > \omega_2$，反之亦然。

[0026] 图 2 示出了在安装在外转子 104 上的永久磁铁 114 相邻的气隙中，安装在图 1 的磁性齿轮 100 的内转子 102 上的永久磁铁 110 的磁通密度空间分布的谐波谱 200。可以理解，谱 200 包括与第一转子 102 的永久磁铁 110 相关联的第一或基本谐波 202。极靴 106 调制永久磁铁 110 的磁场。例如，对于与永久磁铁 114 具有相同数量的极的永久磁铁 110，这导致相当大的异步谐波 204，这使第一转子 102 和第二转子 104 之间的耦合成为可能，以致一个的移动感应另一个按啮合方式的移动。

[0027] 然而，与第一转子 102 的永久磁铁 110 相关联的基本分量 202 是始终存在的，并且是与磁性齿轮相关联的极大多数电磁损耗的源头。

[0028] 熟悉本领域的技术人员会理解在给出第一永久磁铁 110 和第二永久磁铁 114 的情况下如何选择和设计极靴 106，以实现需要的磁路或耦合，以致例如，可以从 K.Atallah, D.Howe 的“A novel high-performance magnetic gear”(IEEETransactions on Magnetics,37 卷, 第 4 期,2844—2846 页,2001) 和 K.Atallah, S.D.Calverley, D.Howe 的“Design, analysis and realisation of a highperformance magnetic gear”(IEEE Proceedings—Electric Power Applications,151 卷,135—143 页,2004) 中理解第一转子 102 和第二转子 104 之间的啮合结果，为了所有的目的合并在此作为参考，并包括在附录

中。

[0029] 图 3 示出已知组件 300，该组件包括与磁性齿轮 304 组合的电马达 / 发电机 302。磁性齿轮 304 与上面参考图 1 所描述的实质上相似。在 US 6794781 的各个实施例中描绘和描述了该种组件。电马达 / 发电机 302 包括具有各个 3—相绕组 306a—3061 的中央电枢 306。组件 300 包括第一或外转子 310，第一或外转子 310 包括安装在，例如，诸如护铁 (back-iron) 之类的，基板 314 上的永久磁铁 312。永久磁铁 312 按啮合的方式与第二 / 内转子 318 的许多永久磁铁 316 耦合。永久磁铁 316 安装在支撑 320 上。使用实质上相互等间隔地设置在圆周上的多个极靴 322 实现建立在内转子 318 的永久磁铁 316 和外转子 310 的永久磁铁 312 之间的磁路或耦合。第二转子 318 的永久磁铁与 3—相绕组 306a—3061 耦合以进行马达 / 发电机操作。外转子 310 是可旋转的。极靴 322 是固定的，内转子 318 是可旋转的，并且中央电枢 306 是固定的。

[0030] 图 4 示出根据本发明的一些实施例的电机 400 的工作原理。电机 400 包括具有支撑 404 的第一或内转子 402，支撑 404 承载第一多个永久磁铁 406。在所示出的实施例中，使用具有 10 个极的永久磁铁。然而，并不局限于使用如此数量永久磁铁的实施例。可以实现使用其它数量永久磁铁的实施例。电机 400 包括多个铁磁极靴形式的第二转子 408。极靴 408 排列成使第一 / 内转子 402 的永久磁铁 406 与多个永久磁铁 410 磁耦合，所述多个永久磁铁 410 固定到各个齿 414 的许多齿尖端 412 上，从而形成定子 416。在所示的实施例中，60 个永久磁铁固定在齿尖端 412 上。该实施例包括具有各自齿尖端 412 的 15 个齿 414。可以理解，并不局限于如此数量的永久磁铁和齿的这些实施例。可以实现包括其它数量的永久磁铁和齿的一些实施例。

[0031] 极靴 408 是可旋转的，即，它们形成转子。内转子 402 是可旋转的。齿 414 和相关联的永久磁铁 410 是固定的。使用可旋转的极靴 408 来实现永久磁铁 406 和永久磁铁 410 之间的耦合。与定子 416 相关联的是多个 3—相绕组 1，1’，2，2’，和 3，3’。安排 3—相绕组和相关联的电路使之产生磁场，该磁场同磁路耦合或形成磁路，所述磁路具有与内转子 402 相关联的永久磁铁 406 的第一或基本谐波。在所示出的实施例中，第一 / 基本谐波对应于具有 5 个极—对的永久磁铁 406。

[0032] 通过利用至今未使用的、与内转子 402 相关联的基本谐波，大大地提高了电机的转矩密度和效率。一些实施例提供了实质上 0.9 的提高的功率因数 (最大为 1)，这表示，与 TFM 相比较，电机的功率因数增加约 200％—300％。

[0033] 图 5 示出根据本发明的一个较佳实施例的电机 500。电机 500 包括承载许多永久磁铁 504 的内转子 502。在所示的实施例中，使用 4 个极的永久磁铁。然而，可以实现使用其它数量永久磁铁的一些实施例。电机 500 包括承载许多铁磁极靴 508 的外转子 506。在所示的实施例中，外转子 506 承载使内转子 502 的永久磁铁 504 和安装到定子 512 的许多永久磁铁 510 之间的磁耦合成为可能的 23 个极靴。定子 512 包括与多个齿 516 的每一个相关联的 3—相绕组 514a—514b。绕组与永久磁铁 504 的第一谐波磁耦合。在较佳实施例中，绕组是 3—相的，但是同样也可以是其它类型的绕组，诸如例如，2—相绕组。所示的实施例包括设置在定子 512 上的永久磁铁 510 的 42 个极。熟悉本领域的技术人员可以理解，相对于绕组 514a-b 描绘的交叉和点示出线圈的极性。外转子 506 的极靴 508 布置成以提供内转子 502 和外转子 506 之间的啮合。在一些较佳实施例中，啮合是如此的，以致内转子

502 是相当高速的转子，而外转子 506 是相当低速的转子。一些较佳实施例具有 11.5 :1 的齿轮比。

[0034] 图 6 示出图 5 所示的电机 500 的轴向截面图 600。可以看到，电机 500 包括外壳 602，该外壳通过多个轴承 604 支撑中央心轴 606，在中央心轴 606 上安装了内转子 502 和相关联的永久磁铁 504，用于与其一起旋转。包括相关联的极靴 508 的外转子 506 经由各个轴承 608 可旋转地安装在心轴 606 和外壳 602 之间。可以理解，电枢或定子 512 是固定的，并且相对于内和外转子是向外设置的。

[0035] 图 7 示出与气隙中的永久磁铁 504 相关联的磁通密度变化的谱 700，所述气隙与图 5 的电机 500 的较佳实施例的永久磁铁 510 相邻。可以理解，谱 700 包括与第一转子 502 的永久磁铁 504 相关联的第一谐波 702。极靴 508 调制永久磁铁 504 的磁场，并且产生相当大的异步谐波 704，具有与永久磁铁 510 相 同的极数量。在该实施例中，与第一转子 502 的永久磁铁 704 相关联的第一谐波 702 与绕组 514a—b 耦合以建立电机能量转换，具有与 TFM 可比拟的转矩密度，但是具有更高的功率因数。

[0036] 图 8 示出根据又一个实施例的电机 800。电机 800 包括承载多个永久磁铁 804 的内转子 802。在所示的实施例中，示出了具有 4 个极的永久磁铁，但是同样可以使用其它数量的永久磁铁。最好内转子 802 是相对高速的转子。电机 800 包括承载多个永久磁铁 808 的外转子 806。在所示的实施例中，具有 38 个极的永久磁铁 808 形成部分外转子 806。然而，可以使用其它极数量的永久磁铁 808。电机 800 包括承载多个极靴 812 以及 3—相绕组 814 的静止电枢 810。在该实施例中，极靴的数量是 21 个，虽然在一些实施例中可以使用其它数量的极靴。应该注意，已经示出了使用 3—相绕组的实施例。然而，实施例并不局限于此。可以实现使用其它绕组的一些实施例，例如，诸如使用 2 相绕组。第二 / 外转子 806 形成相对低速的转子，该相对低速的转子以啮合方式经由静止电枢 810 的极靴 812 与相对高速的第一 / 内转子 802 耦合。熟悉本领域的技术人员可以理解，齿轮比是 19 :1，并且与内转子 802 上的极—对数以及极靴数有关。可以理解，将电流施加于 3—相绕组 814 会导致高速转子 802 旋转，这依次导致低速转子 806 旋转。再次，可以理解，绕组 814a-b 与第一 / 内转子 802 的永久磁铁 804 相关联的第一谐波耦合而建立电机能量转换，具有与横向磁场电机可比拟的转矩密度，但是具有更高的功率因数。

[0037] 图 9 示出图 8 的电机 800 的较佳实施例中在与永久磁铁 808 相邻的气隙中与永久磁铁 804 相关联的磁通密度变化的谱 900。可以理解，谱 900 包括与第一转子 802 的永久磁铁 804 相关联的第一谐波 902。极靴 812 调制永久磁铁 804 的磁场，并且产生具有与永久磁铁 808 相同数量的极、相当大的异步谐波 904。在该实施例中，与第一转子 802 的永久磁铁 904 相关联的第一或基本谐波 902 与绕组 814 耦合以建立电机能量转换。

[0038] 可以理解，已经参考电机描述了本发明的一些实施例。熟悉本领域的技术人员会理解，可以使用如此的电机作为马达或发电机。向绕组施加 3—相电源导致啮合的电气马达。然而，使转子 502/508 或 802/806 之一旋转导致电机用作啮合的发电机。此外，虽然已经参考使用 3—相绕组描述了上述实施例，但是实施例并不局限于如此的配置。可以实现一些实施例，在这些实施例中使用某些其它形式的绕组，例如，诸如 2—相绕组。

[0039] 还可以按径向场旋转电机和轴向场旋转电机的形式来实现本发明的一些实施例。

[0040] 附录

[0041] 新颖的高性能磁性齿轮

[0042] K.Atallah 和 D.Howe

[0043] 摘要

[0044] 广泛地使用机械齿轮箱来使原动机 (prime-mover) 的工作速度与它们的负载要求匹配。虽然,可以实现高的系统转矩密度,但是通常需要齿轮润滑和冷却,而噪声、振动和可靠性是重大的问题。本文描述使用稀土磁铁的磁性齿轮的设计和性能它的模拟研究已经示出其具有超过 100kNm/m3 的传输转矩密度。

[0045] 术语索引 :齿轮箱、齿轮、磁路。

[0046] I. 引言

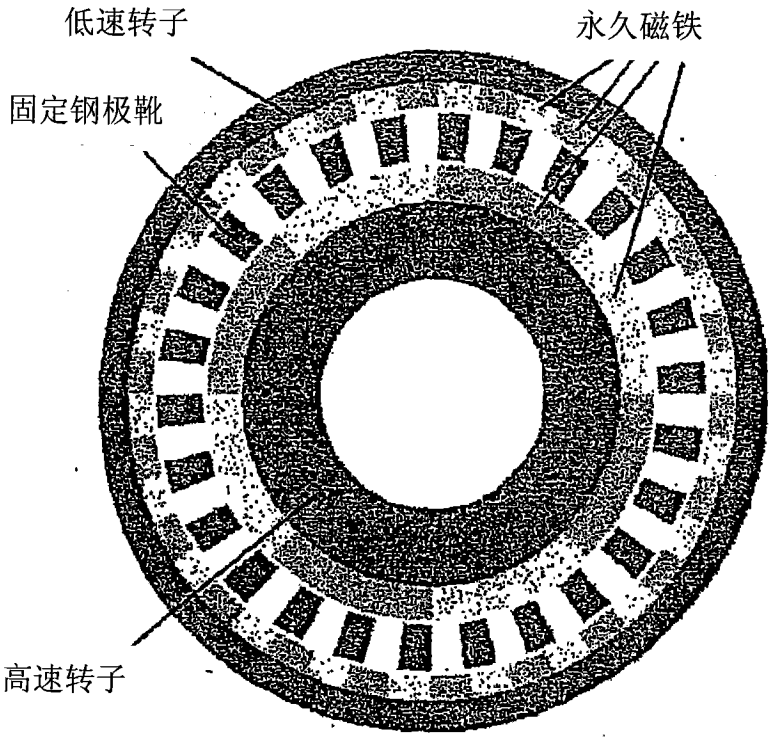
[0047] 由于与齿轮箱一起使用高速电机来变换速度和转矩通常是成本高和重量显著的,所以广泛地使用机械齿轮箱来使原动机 (prime-mover) 的工作速度与它们的负载要求匹配,以便增加旋转速度 (例如,风力发电机) 和减小速度 (例如,电气船用推进器)。然而,虽然可以实现高的系统转矩密度,但是通常要求齿轮润滑和冷却,而噪声、振动和可靠性是重大的问题。对比之下,磁性齿轮受到相当少的注意,大概是因为已经提出的磁路 [1]、[2] 的相对复杂性和较差的转矩密度。对于不能容纳机械啮合的一些应用,必须使用直接电气驱动。对于各种有竞争的直接驱动机器布局,永久磁铁横向磁场电机潜在地提供最高的转矩密度 [3]、[4],一般在 40—80kNm/m^3 的范围内。然而,由于它们固有的较差的功率因数,它们对于发电应用是不适合的,对于电动回转 (motoring) 应用,它们与传统永久磁铁无电刷机器相比需要显著较高的转换器伏—安额定值。本文描述磁性齿轮的设计和性能,该磁性齿轮使用稀土磁铁,其模拟研究已经示出其所具有的传输转矩密度能力可以与两—和三—级螺旋形齿轮箱相比拟,即,50—150kNm/m^3。当与永久磁铁无电刷机器的传统布局组合时,在更多的电气飞机引擎、电气船用推进器、风力发电机等广泛地实施的马达 / 发电机单元的应用中,如此的磁性齿轮箱可以提供显著的优点。

[0048] (2000 年 10 月 13 日接收到原稿。

[0049] 作者们是英国,Sheffield S1,3JD 的 Sheffield 大学的电子和电气工程部的 (电子邮件 :k.atallah@sheffield.ac.uk)。

[0050] 出版项目识别号 S 0018—9464(01)07092—3。)

[0051]



[0052] 图 1 磁性齿轮的示意图

[0053] II. 工作原理

[0054] 图 1 示出提出的磁性齿轮布局的示意图。可以看到，由下式给出在通过高速或低速转子永久磁铁产生的空间谐波磁通密度分布中的极—对数量：

[0055] $p_{m,k} = |mp+kn_s|$

[0056] $m = 1,3,5,\ldots,\infty$ (1)

[0057] $k = 0, \pm1, \pm2, \pm3,\ldots, \pm\infty$

[0058] 其中 p 是永久磁铁转子上的极—对数量，而 n_s 是固定钢极靴的数量。此外，由下式给出磁通密度空间谐波的旋转速度：

[0059] $$\Omega_{m,k} = \frac{mp}{mp + kn_s}\Omega_r \qquad (2)$$

[0060] 其中 Ω_r 是永久磁铁转子的旋转速度。从 (2) 可看到，由于引入了钢极靴，即，$k \neq 0$，空间谐波的速度与承载永久磁铁的转子的速度不同。因此，为了以不同速度来传输转矩，其它永久磁铁转子的极—对数量必须与 $k \neq 0$ 的空间谐波的极—对数量相等。于是由下式给出齿轮比：

[0061] $$G_r = \frac{mp}{|mp + kn_s|}. \qquad (3)$$

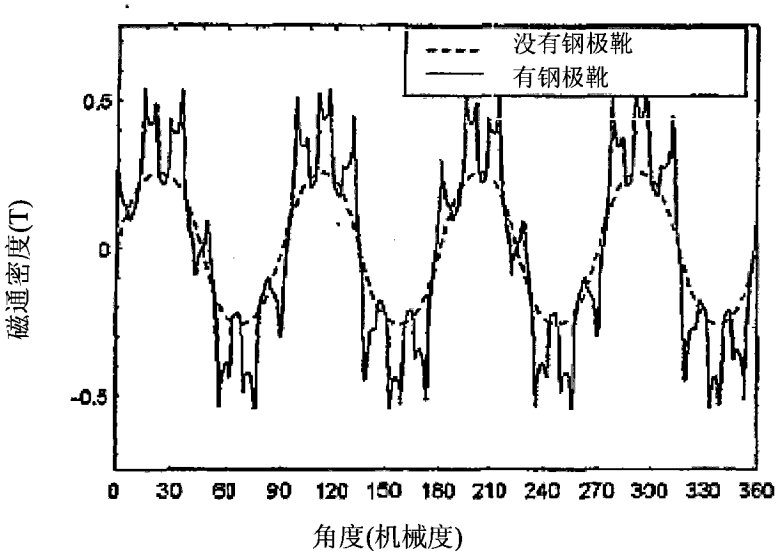
[0062] 表 I

[0063] 磁性齿轮的参数

[0064]

参数	
高速转子上的极－对数量	$P_h=4$
低速转子上的极－对数量	$P_l=22$
静止钢极靴数量	$n_s=26$
气隙长度	1 mm
外侧直径	140 mm
烧结的 NdFeB 的剩磁	Br＝1.25T
烧结的 NdFeB 的相对反冲导磁率	$\mu_r=1.05$
硅钢叠片结构的等级	A300-35

[0065]



[0066] 图 2 示出由在低速转子相邻的气隙中的高速永磁转子引起的径向磁通密度的的变化

[0067] III. 模拟研究

[0068] 使用两—维静磁有限元件法进行模拟研究。表 I 给出已经为图 1 所示的磁性齿轮假设的参数。高和低速转子都配备有烧结的 NdFeB 永久磁铁，并且由硅钢叠层结构来制造钢极靴和转子铁心。

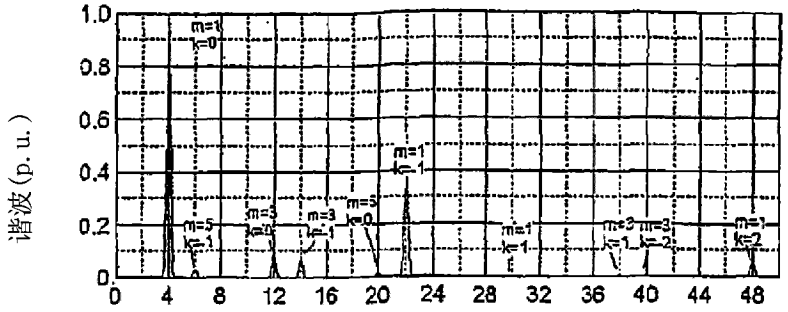
[0069] A. 磁通密度分布

[0070] 图 2 示出由在低速转子相邻的气隙中的高速转子永久磁铁引起的磁通密度的径向分量的变化，而图 3 示出对应的空间谐波谱。可以看到，钢极靴的存在导致许多异步的，即，$k \neq 1$，空间谐波，最大的是 22 个极—对空间谐波，($m = 1, k = -1$)，它与 22 个极—对低速转子永久磁铁相互作用而以下式所示的旋转速度来传输转矩：

[0071] $$\Omega_l = \frac{p_h}{p_h - n_s}\Omega_h = -\frac{1}{5.5}\Omega_h \qquad (4)$$

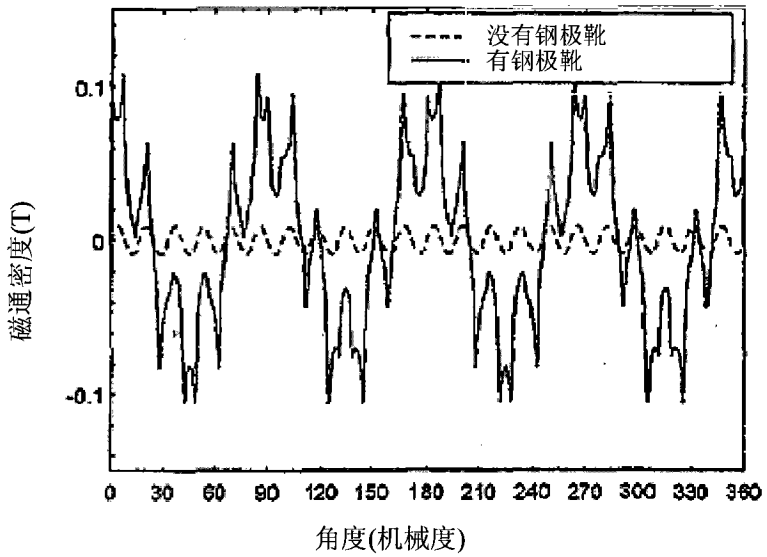
[0072] 其中 Ω_h 和 Ω_l 分别是高和低速转子的旋转速度。

[0073]



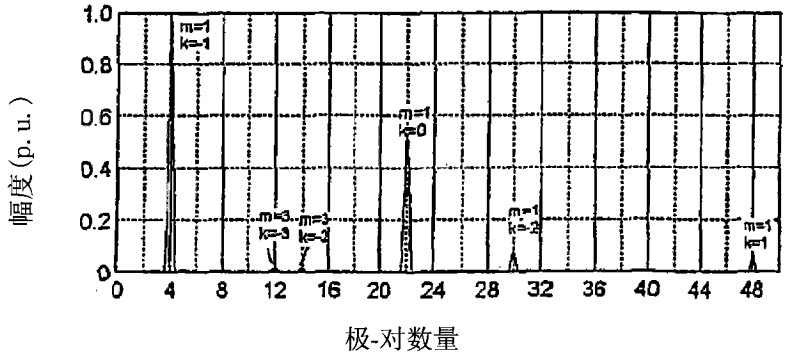
[0074] 图 3 由在低速转子相邻的气隙中的高速永磁转子引起的径向磁通密度的空间谐波谱

[0075]



[0076] 图 4 由在高速转子相邻的气隙中的低速永磁转子引起的空间谐波谱

[0077]



[0078] 图 5 由在高速转子相邻的气隙中的低速永久磁铁转子引起的径向磁通密度的空间谐波谱

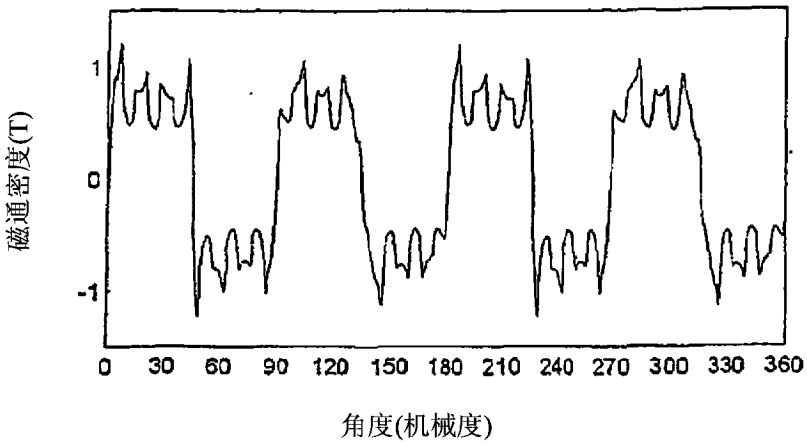
[0079] 相似地，图 4 示出由在高速转子相邻的气隙中的低速转子永久磁铁引起的磁通密度的径向分量的变化，而图 5 示出对应的空间谐波谱。可以看到，钢极靴的存在导致占优势

的 4 个极—对异步空间谐波，(m = 1，k = -1)，它与 4 个极—对的高速转子永久磁铁相互作用而以下式所示的旋转速度来传输转矩：

[0080] $$\Omega_h = \frac{p_l}{p_l - n_s}\Omega_l = -5.5\,\Omega_l. \qquad (5)$$

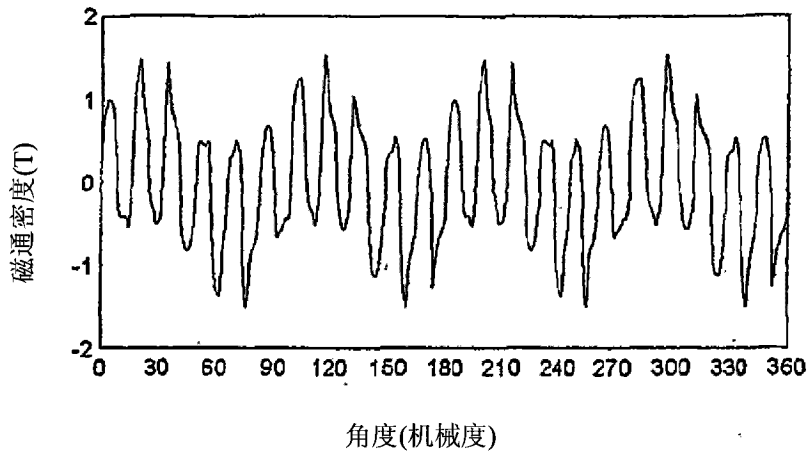
[0081] 其中 Ω_h 和 Ω_l 分别是高和低速转子的旋转速度。

[0082]



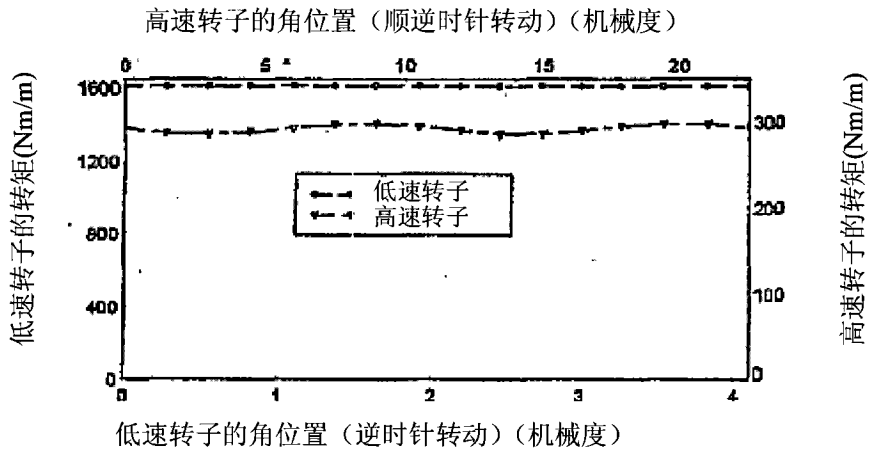
[0083] 图 6 高速转子相邻的气隙中合成的磁通密度的径向分量的变化

[0084]



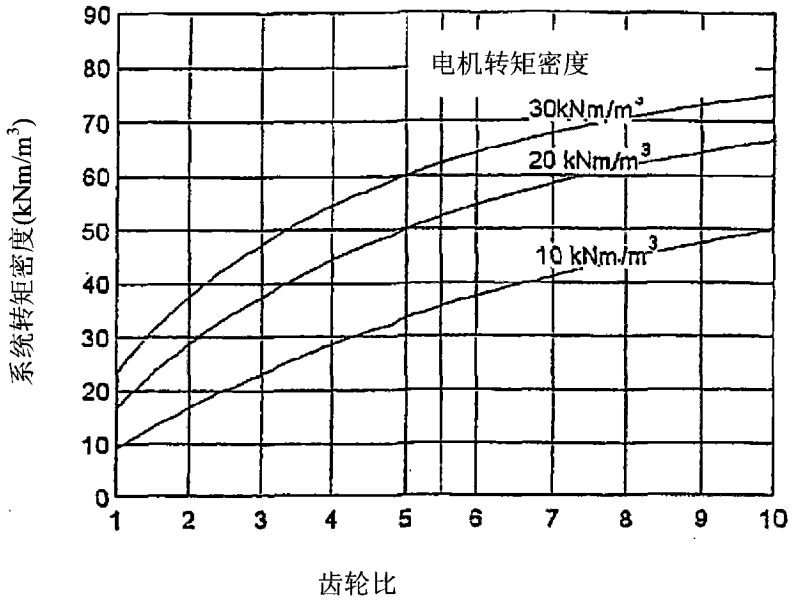
[0085] 图 7 低速转子相邻的气隙中合成的磁通密度的径向分量的变化

[0086]



[0087] 图 8 低速和高速转子上最大转矩的变化

[0088]



[0089] 图 9 对于不同的电机转矩密度（磁性齿轮转矩密度是 100kNm/m3），系统转矩密度随齿轮比的变化

[0090] 图 6 和 7 示出由分别在高和低速转子相邻的气隙中的两种永磁转子引起的合成磁通密度径向分量的变化。

[0091] B. 转矩传输

[0092] 图 8 示出当高和低速转子旋转时施加在它们上的最大转矩的变化。如所看到的，可以 实现超过 100kNm/m^3 的传输转矩密度。图 9 示出组合的磁性齿轮和永磁无电刷机的系统转矩密度是如何随机器的齿轮比和转矩密度而变化的，对于自然冷却的、强制性空气冷却的和液体冷却的径向场永久磁铁无电刷电机，通常分别为 10kNm/m^3、20kNm/m^3、和 30kNm/m^3。如所看到的，通过使用 5—10 之间的齿轮比和传统的径向场机器布局可以实现与当前技术水平的横向磁场电机可比拟的或更优的系统转矩密度，具有使制造简单化、提高功率因数等附带的优点。

[0093] 除了机械损耗，即轴承磨损和转子偏差，之外，磁性齿轮具有两个电磁损耗分量，

即：

[0094] • 在两个转子的层叠的护铁中以及固定的层叠钢极靴中的铁损耗。

[0095] • 在转子永久磁铁中诱发的涡流损耗。

[0096] 进行了进一步的模拟研究，以评估这些在所提出的磁性齿轮的效率和热性能方面的效应。

[0097] IV. 结论

[0098] 已经展示了高性能磁性齿轮的新颖布局。已经示出，通过使用稀土磁铁，可以实现超过 100kNm/m^3 的转矩密度。还已经示出了系统（即磁性齿轮和电机）转矩密度可比拟于或更优于横向磁场电机。

[0099] 参考资料

[0100] D.E.Hesmondhaigh 和 D.Tipping，“多元件磁性齿轮 (A multielement magneticgear)”，IEE Proceedings，B 部分，127 卷，129-158 页，1980。

[0101] K.Tsurumoto 和 S.Kikushi，“使用永久磁铁的新的磁性齿轮 (A new magnetic gearusing permanent magnet)”，IEEE transaction on Magnetics，MAG-23 卷，第 5 期，3622-3624 页，1987。

[0102] M.R.Harris，G.H.Pajooman 和 S.M.Abu Sharkh，“具有异极表面磁铁和同极绕组的电机的性能和设计最优化 (Performance and design optimization of electricmotors with heteropolar surface magnets and homopolar windings)”，IEE Proceedings，B 部分，143 卷，第 6 期，429-436 页，1996。

[0103] H.Weh，“驱动和发电应用中的横向通量 (TF) 机器 (Transverse flux(TF)machines in drive and generator applications)”，Proceedings of IEEE/KTH StockholmPower Technology Conference，Stockholm，Sweden，1995，75-80 页。

[0104] 高性能磁性齿轮的设计、分析和实现

[0105] K.Atallah、S.D.Calverley 和 D.Howe

[0106] 摘要：与机械齿轮相比，磁性齿轮提供巨大的潜在优点，诸如减少维护和提高可靠性，固有的过载保护以及输入和输出轴之间的物理隔离。然而，至今，它们受到较少的注意，可能是由于已经提出的磁路布局具有相对较差的转矩传输能力。描述了一种新的磁性齿轮布局，它组合了有高度竞争性的转矩传输能力和极高的效率。

[0107] I. 引言

[0108] 由于通常使用高速电机与齿轮箱一起来变换速度和转矩是成本高和重量显著的，所以广泛地使用机械齿轮箱来使原动机 (prime-mover) 的工作速度与它们的负载要求匹配，以便增加旋转速度（例如，风力发电机）和减小速度（例如，电气船用推进器）。磁性齿轮提供数个潜在的优点，诸如：

[0109] • 减少声音噪声和振动，例如，这对于海军的推进系统是一个重要的因素。

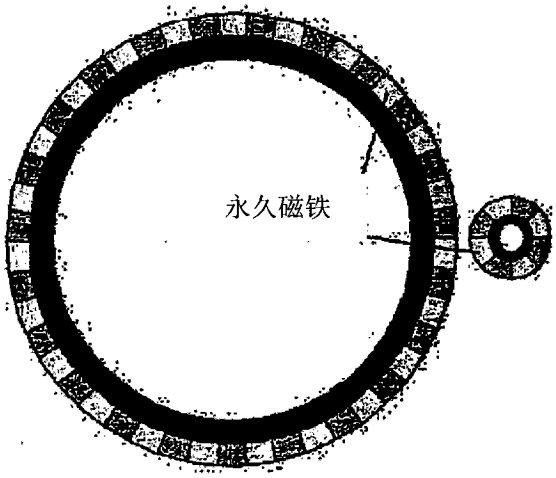
[0110] •减少维护和提高可靠性，例如，这对于“更多—电子”的飞机是一个关键的考虑。

[0111] • 精确的峰值转矩传输能力以及固有的负载保护，例如，对于制造机器的共同要求。

[0112] • 输入和输出轴之间的物理隔离，例如，这对于在许多泵应用中防止处理液体的污染是有利的。

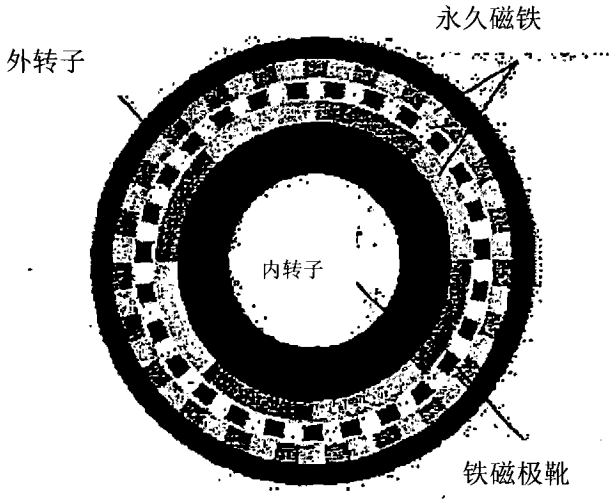
[0113] 然而，尽管有这些优点，磁性齿轮仍受到相当小的注意，大概是因为已经提出的磁路的相对复杂性和较差的转矩密度。提出了一种磁性齿轮布局，它使用可变磁阻原理来传输转矩，并且与以前的布局相比，具有更提高的磁路利用率[1]。然而，它的转矩传输能力和效率分别低于 5kNm/m^3 和 35%。还提出和分析了使用高能量永久磁铁的磁性齿轮[2、3]。然而，它们特征为都具有较差的磁路，如图 2 所示，其中，在任何时刻，只有一部分的永久磁铁对转矩传输有贡献。因此，它们特定的转矩能力和效率也是低的。因此，在不能接纳机械齿轮的应用中，使用直接电气驱动，提供最高转矩密度的横向磁场电机在相当低的功率因数下工作。

[0114]



[0115] 图 1 典型的传统外磁性齿轮的示意图

[0116]



[0117] 图 2 提出的磁性齿轮布局

[0118] 本文描述图 2 所示的磁性齿轮布局的设计和性能。它的内转子和外转子两者都使用稀土永久磁铁，并且在两个转子之间具有铁磁极靴。然而，与图 1 所示的布局不同，所有的永久磁铁对于转矩传输都有贡献。当然，模拟和经验研究已经示出如此的齿轮具有与两—和三—级螺旋形齿轮箱可比拟的传输转矩密度能力，即，50—150kNm/m^3。因此，当与永磁无电刷机的传统布局结合时，在实施在“更多电子”的飞机引擎、电气船用推进系统、风力

发电等中的马达 / 发电机单元的广泛的应用中，如此的磁性齿轮可以提供非常大的优点。

[0119] 2. 工作原理

[0120] 磁性齿轮的基本工作原理是通过铁磁极靴调制由每个永久磁铁转子产生的磁场，以致 产生适当的空间谐波，这些空间谐波具有与相关联的永久磁铁转子一样的必需数量的极。

[0121] 可以把通过每个永久磁铁转子产生的、在径向距离 r 处的磁通密度分布写成如下的形式：

[0122] 对于径向分量：

[0123]

$$B_r(r,\theta)=\overbrace{\left(\sum_{m=1,3,5,..} b_{rm}(r)\cos\left(mp(\theta-\Omega_r t)+mp\theta_0\right)\right)}^{\text{没有铁磁极靴的磁通密度分布}}\times\overbrace{\left(\lambda_{r0}(r)+\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{rj}(r)\cos\left(jn_s(\theta-\Omega_s t)\right)\right)}^{\text{调制函数}} \quad (1a)$$

[0124] 以及对于圆周分量：

[0125]

$$B_\theta(r,\theta)=\overbrace{\left(\sum_{m=1,3,5,..} b_{\theta m}(r)\sin\left(mp(\theta-\Omega_r t)+mp\theta_0\right)\right)}^{\text{没有铁磁极靴的磁通密度分布}}\times\overbrace{\left(\lambda_{\theta 0}(r)+\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{\theta j}(r)\cos\left(jn_s(\theta-\Omega_s t)\right)\right)}^{\text{调制函数}} \quad (1b)$$

[0126] 其中 p 是永久磁铁转子上的极—对的数量，n_s 是铁磁极靴的数量，以及 Ω_r 和 Ω_s 分别是永久磁铁转子和铁磁极靴的旋转速度。此外，b_{rm}、$b_{\theta m}$ 分别是没有铁磁极靴时的磁通密度分布的径向和周向分量的傅里叶系数。相似地，对于圆周分量，λ_{rj} 和 $\lambda_{\theta j}$ 分别是与引入铁磁极靴而产生的磁通密度分布的径向和周向分量相关联的调制函数的傅里叶系数。因此，对于径向分量，从 (1)

[0127] $$B_r(r,\theta)=\lambda_{r0}\sum_{m=1,3,5} b_{rm}(r)\cos\left(mp(\theta-\Omega_r t)+mp\theta_0\right) \quad (2a)$$

[0128] $$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,..}\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{rj}(r)b_{rm}(r)\cos$$

[0129] $$\left((mp+jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\Omega_r+jn_s\Omega_s)}{(mp+jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right)$$

[0130] $$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,..}\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{rj}(r)b_{rm}(r)\cos$$

[0131] $$\left((mp-jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\Omega_r-jn_s\Omega_s)}{(mp-jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right)$$

[0132] 以及对于圆周分量，

[0133] $$B_\theta(r,\theta)=\lambda_{\theta 0}\sum_{m=1,3,5}b_{\theta m}(r)\sin(mp(\theta-\Omega_r t)+mp\theta_0)$$

[0134] $$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,..}\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{\theta j}(r)b_{\theta m}(r)\sin$$

[0135] $$\left((mp+jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\Omega_r+jn_s\Omega_s)}{(mp+jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right)$$

[0136] $$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,..}\sum_{j=1,2,3,..}\lambda_{\theta j}(r)b_{\theta m}(r)\sin \qquad (2b)$$

[0137] $$\left((mp-jn_s)\left(\theta-\frac{(mp\Omega_r-jn_s\Omega_s)}{(mp-jn_s)}t\right)+mp\theta_0\right)$$

[0138] 因此，从 (2)，由下式给出各个永久磁铁转子产生的空间谐波磁通密度分布中极靴的数量：

[0139] $p_{m,k}=|mp+kn_s|$

[0140] $m=1,3,5,\ldots,\infty$ (3)

[0141] $k=0,\pm1,\pm2,\pm3,\ldots,\pm\infty$

[0142] 并且由下式给出磁通密度空间谐波的旋转速度：

[0143] $$\Omega_{m,k}=\frac{mp}{mp+kn_s}\Omega_r+\frac{kn_s}{mp+kn_s}\Omega_s \qquad (4)$$

[0144] 从 (4)，可以看到，由于引入铁磁极靴，即，$k\neq0$，而导致的空间谐波的速度与他们正调制其磁场的转子的速度是不同的。因此，为了以不同的旋转速度传输转矩，其它永久磁铁转子的极—对数量必须与 $k\neq0$ 的空间谐波的极—对数量相等。由于组合 $m=1$、$k=-1$ 导致最高的异步空间谐波，其它转子的极—对数量必须等于 (n_s-p)。然后，当保持调制极靴为静止时，即，$\Omega_s=0$ 时，由下式给出齿轮比：

[0145] $$G_r=\frac{n_s-p}{p} \qquad (5)$$

[0146] 另一方面，如果保持其它永久磁铁转子为静止，则使转矩传输到调制铁磁极靴，并且齿轮比变成：

[0147] $$G_r=\frac{n_s}{p} \qquad (6)$$

[0148] 这可能是较佳的工作配置，由于它简化了齿轮的总的机械设计，虽然，由于它正在旋转，所以必须更小心地考虑铁磁极靴结构的刚性。此外，它使传输较高的转矩成为可能，增加的量与齿轮比有关，这随静止极靴的变化结果而变化，(5)、(6) 比较。

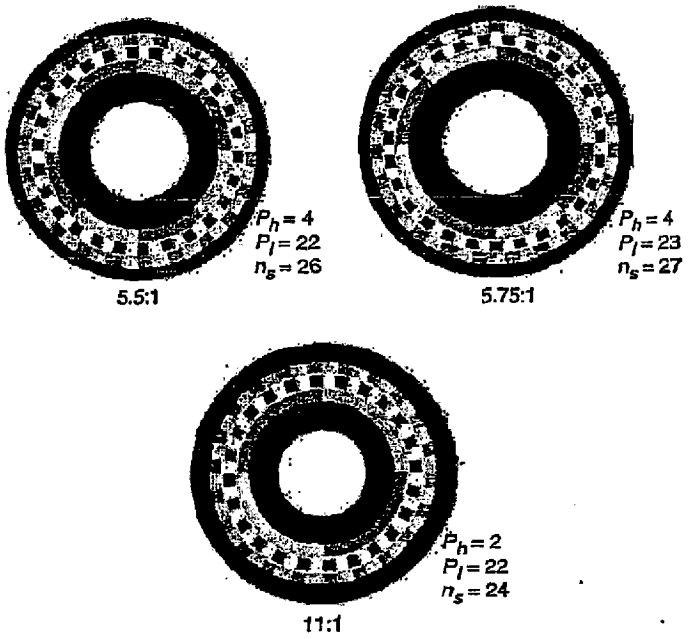
[0149] 公式 (5) 和 (6) 示出，对于给定的齿轮比，存在内永久磁铁转子上的极—对 p_h、外永久磁铁转子 p_b 上的极—对以及铁磁极靴数量 n_s 的相当大数量的切实可行的组合。

[0150] 3. 模拟研究

[0151] 图 3 示出使用两维磁性静态有限元件方法的、为分析而选择的三个磁性齿轮的示意图，齿轮比分别为 5.5:1、5.75:1 和 11:1。对于三个齿轮，铁磁极靴是静止的，内和外永

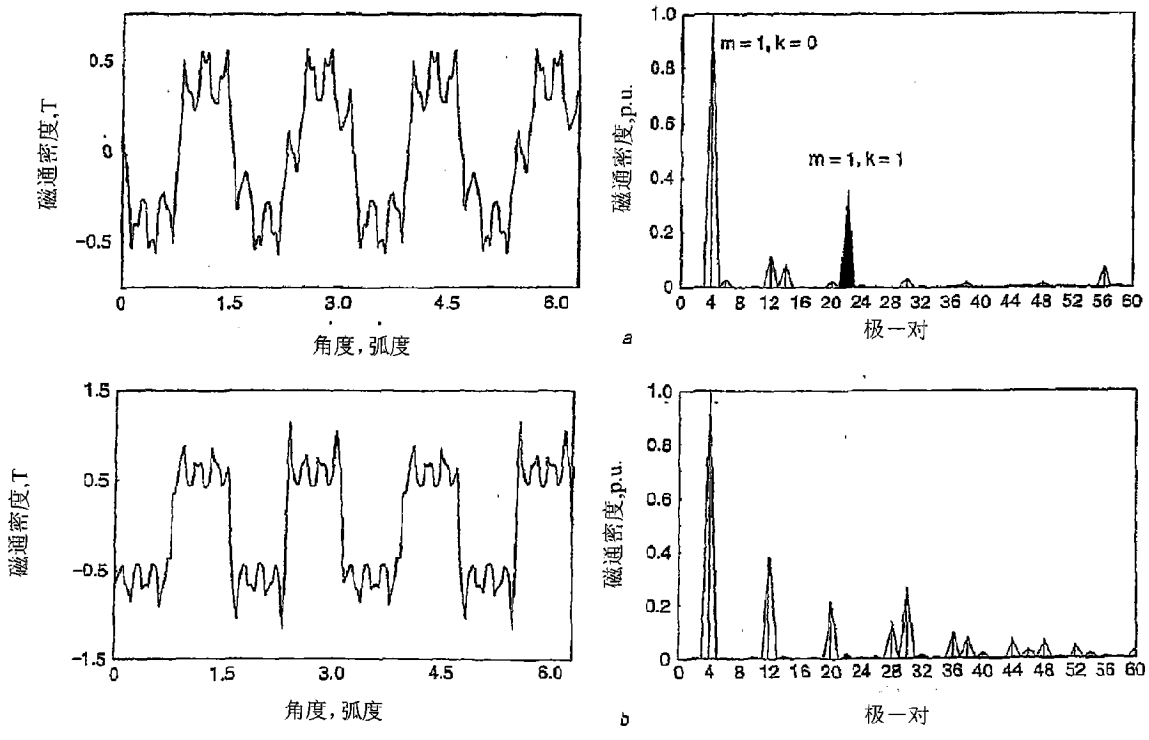
久磁铁转子分别是高速转子和低速转子。此外，对于三个齿轮，承载分量的磁通的总直径，即，有效直径，是 140mm，与低速转子相邻的气隙的直径是 113mm，并且在低速转子上的永久磁铁的厚度是 6mm。

[0152]



[0153] 图 3 磁性齿轮示意图

[0154]



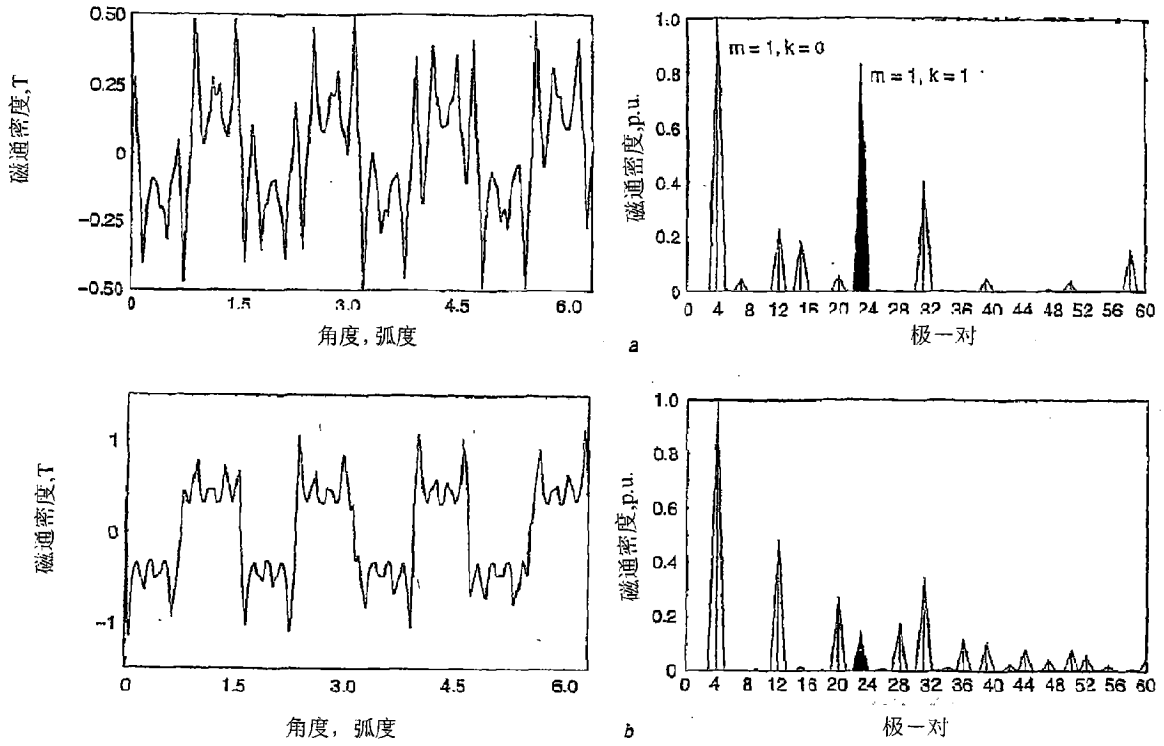
[0155] 图 4 对于 a. 在与低速转子相邻的气隙中的、

[0156] b. 在与高速转子相邻的气隙中的

[0157] 5.5:1 的磁性齿轮，由高速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空

间谐波谱

[0158]

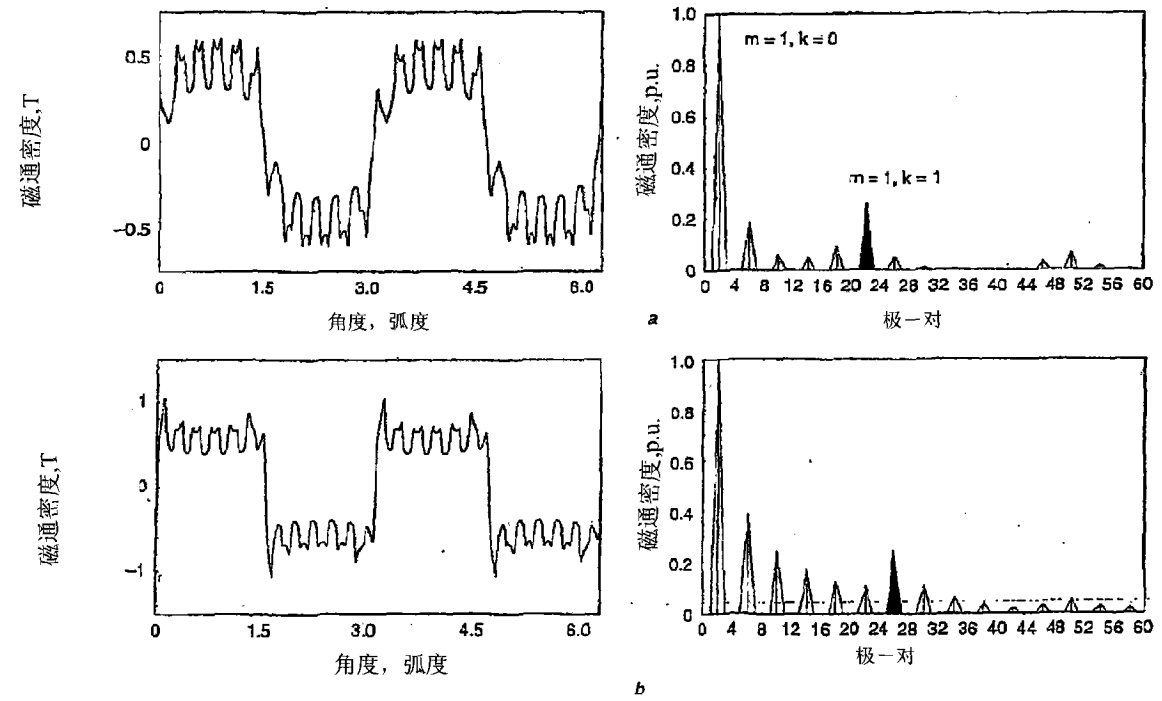


[0159] 图 5 对于 a. 在与低速转子相邻的气隙中的、

[0160] b. 在与高速转子相邻的气隙中的

[0161] 5.75:1 的磁性齿轮，由高速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空间谐波谱

[0162]

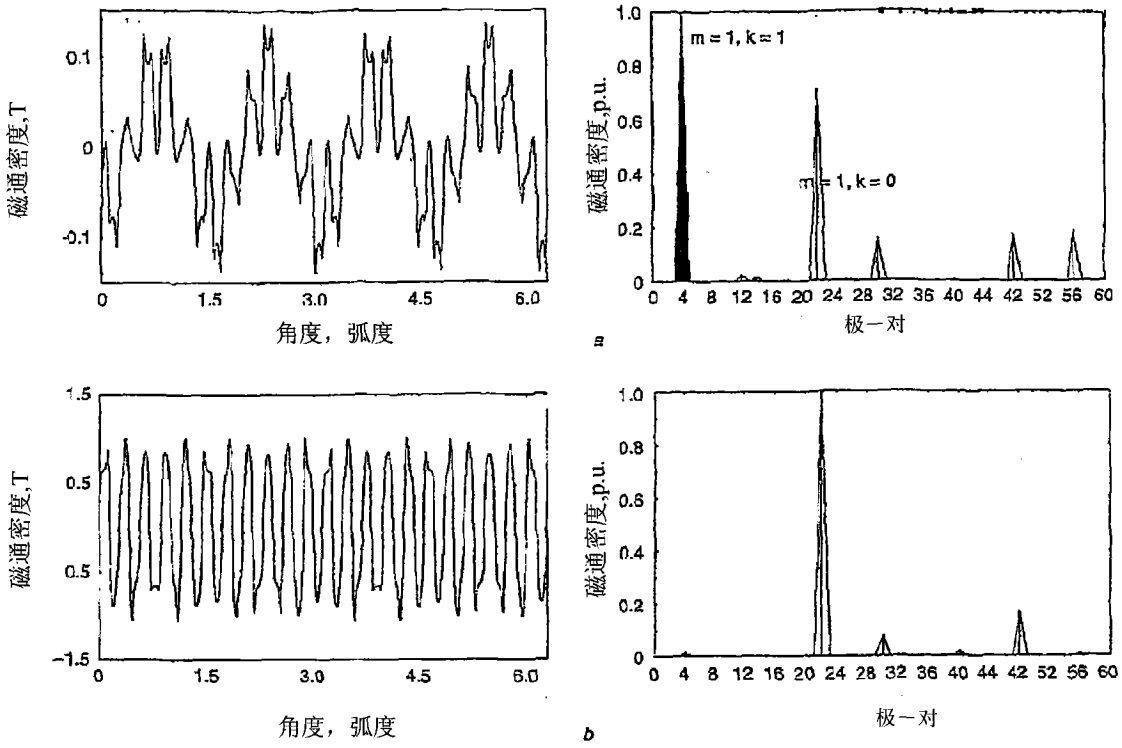


[0163] 图 6 对于 a. 在与低速转子相邻的气隙中的、

[0164] b. 在与高速转子相邻的气隙中的

[0165] 11:1 的磁性齿轮，由高速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空间谐波谱

[0166]

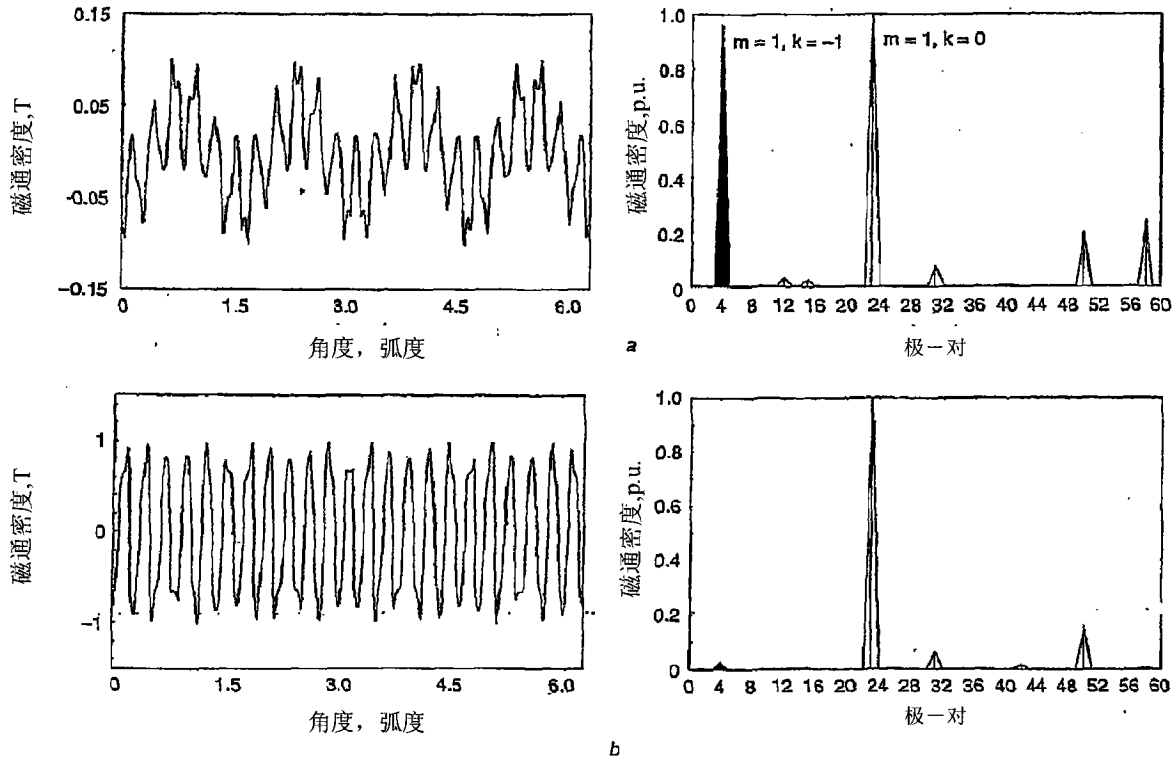


[0167] 图 7 对于 a. 在与高速转子相邻的气隙中的、

[0168] b. 在与低速转子相邻的气隙中的

[0169] 5.5:1 的磁性齿轮，由低速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空间谐波谱

[0170]

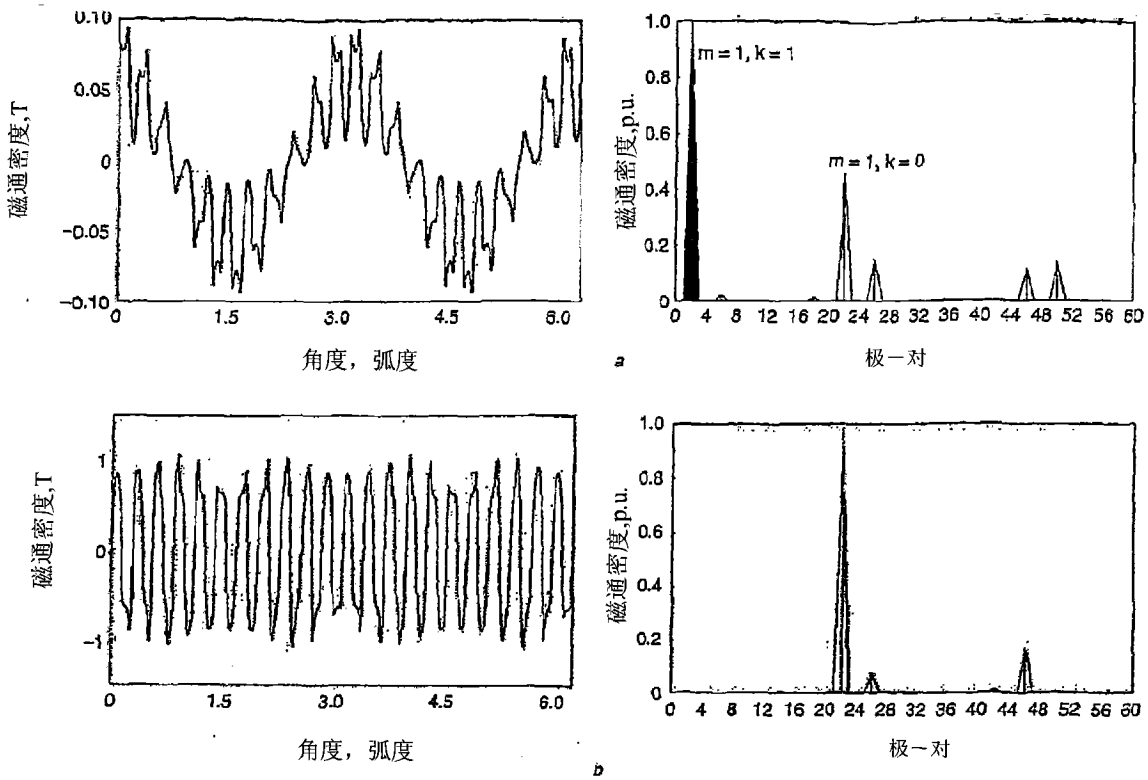


[0171] 图 8 对于 a. 在与高速转子相邻的气隙中的、

[0172] b. 在与低速转子相邻的气隙中的

[0173] 5.75:1 的磁性齿轮，由低速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空间谐波谱

[0174]

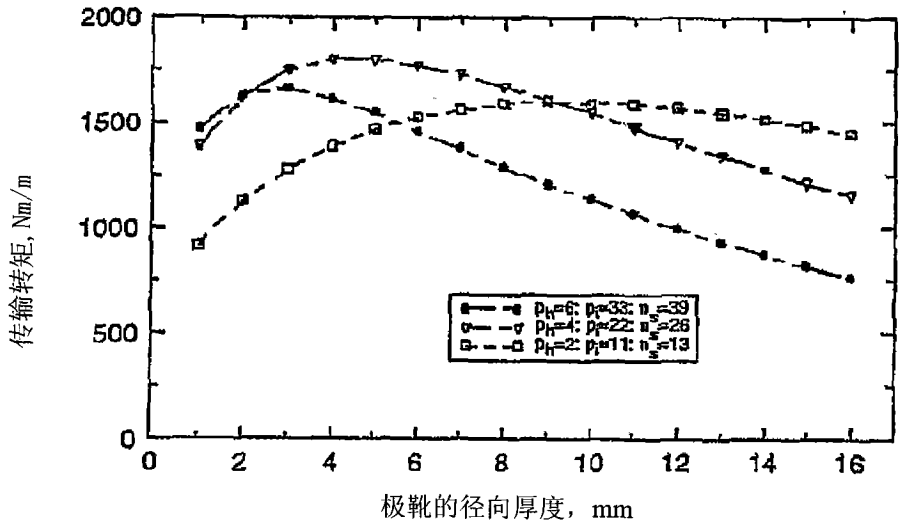


[0175] 图 9 对于 a. 在与高速转子相邻的气隙中的、

[0176] b. 在与低速转子相邻的气隙中的

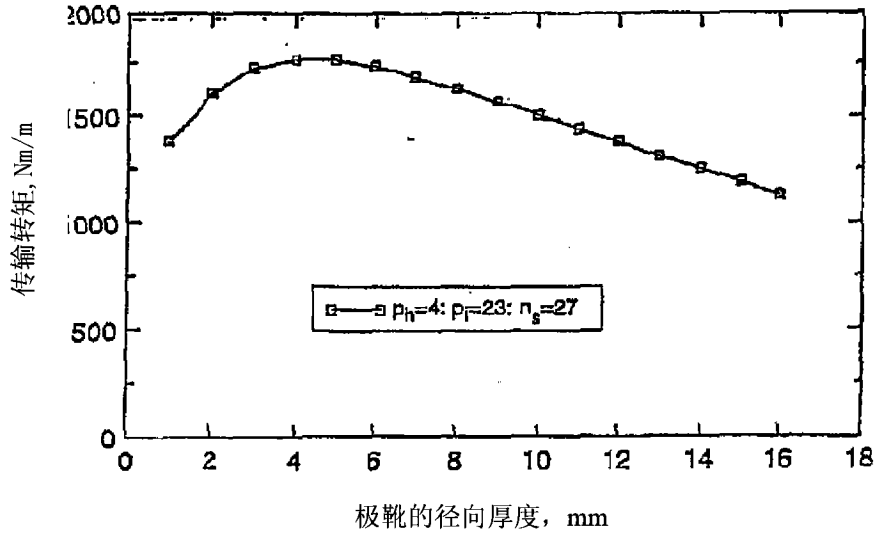
[0177] 11:1 的磁性齿轮，由低速转子永久磁铁引起的径向磁通密度波形，以及它们的空间谐波谱

[0178]



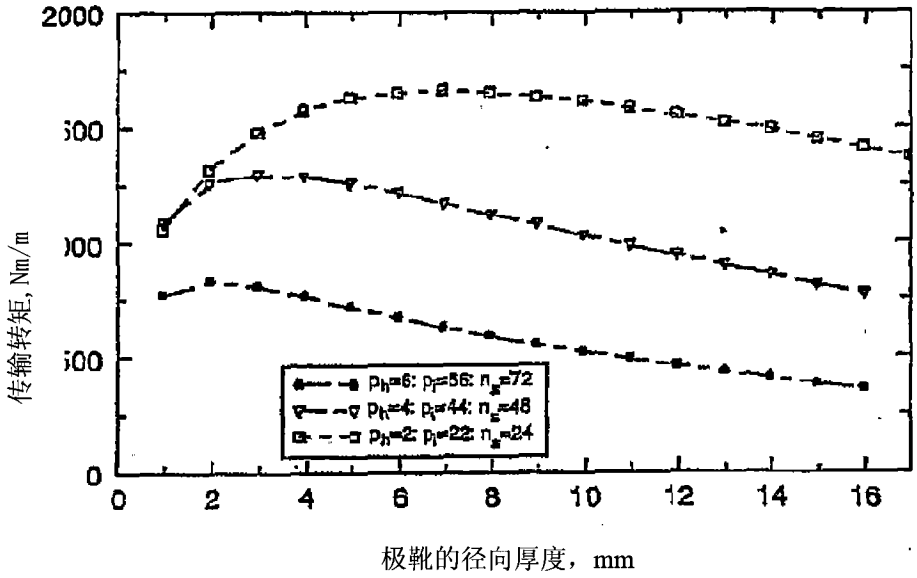
[0179] 图 10 对于 5.5:1 的磁性齿轮，低速转子上最大转矩随极靴径向厚度的变化

[0180]



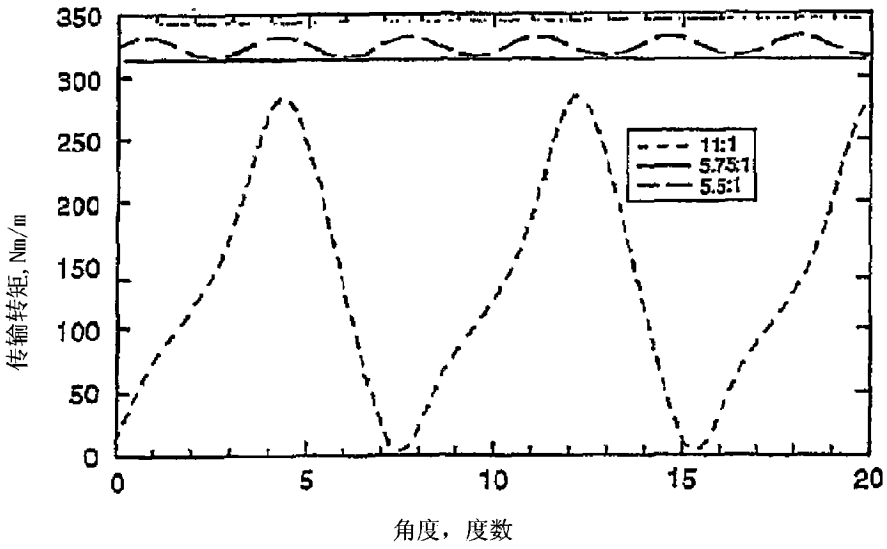
[0181] 图 11 对于 5.75:1 的磁性齿轮，低速转子上最大转矩随极靴径向厚度的变化

[0182]



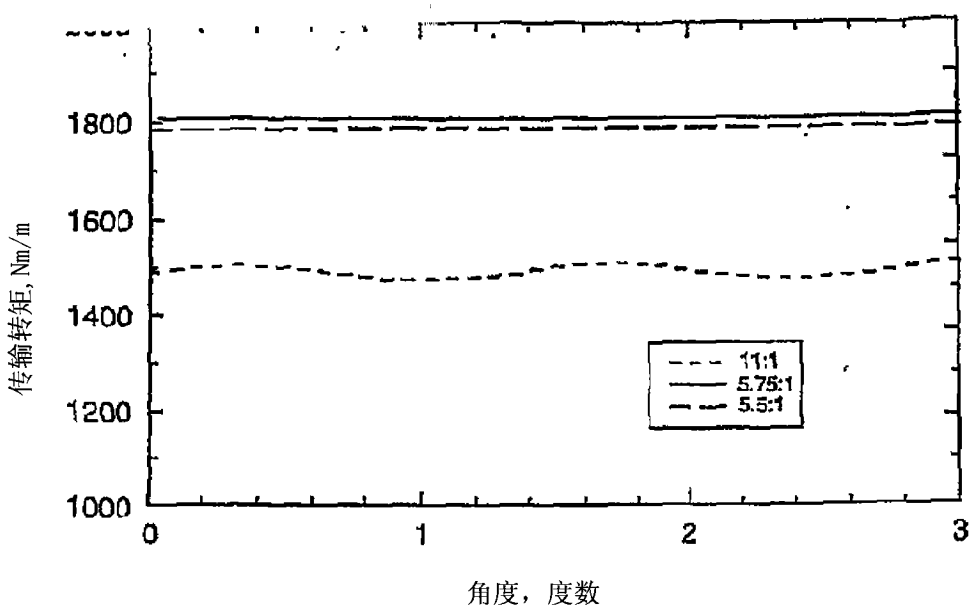
[0183] 图 12 对于 11:1 的磁性齿轮，低速转子上最大转矩随极靴径向厚度的变化

[0184]



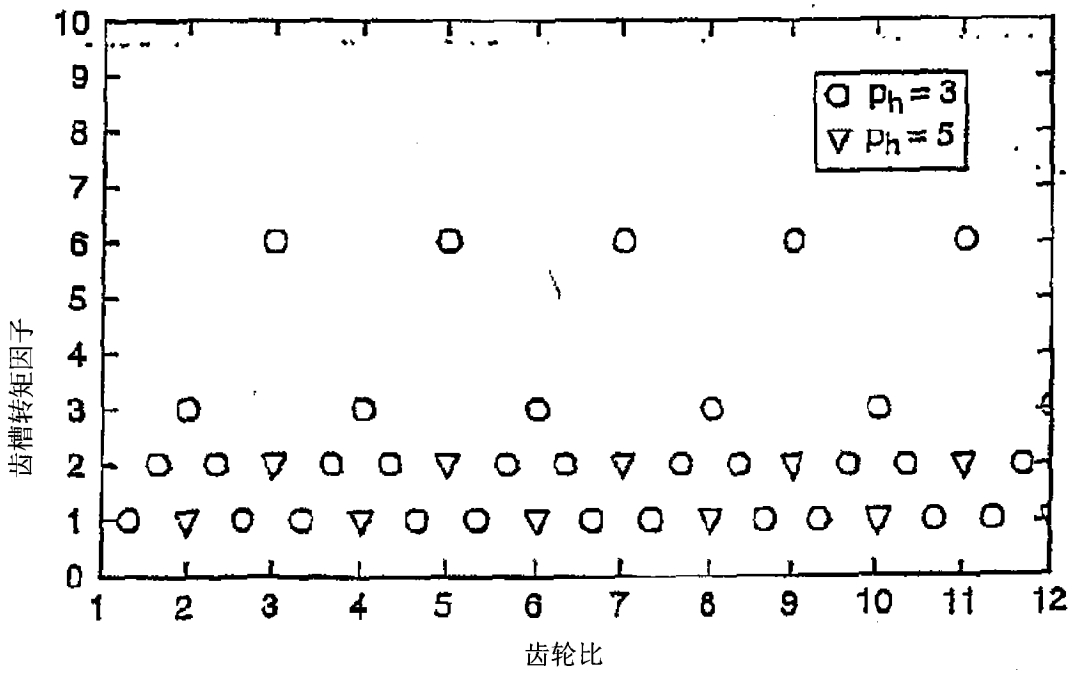
[0185] 图 13 传输转矩随高速转子的角度位置的变化

[0186]



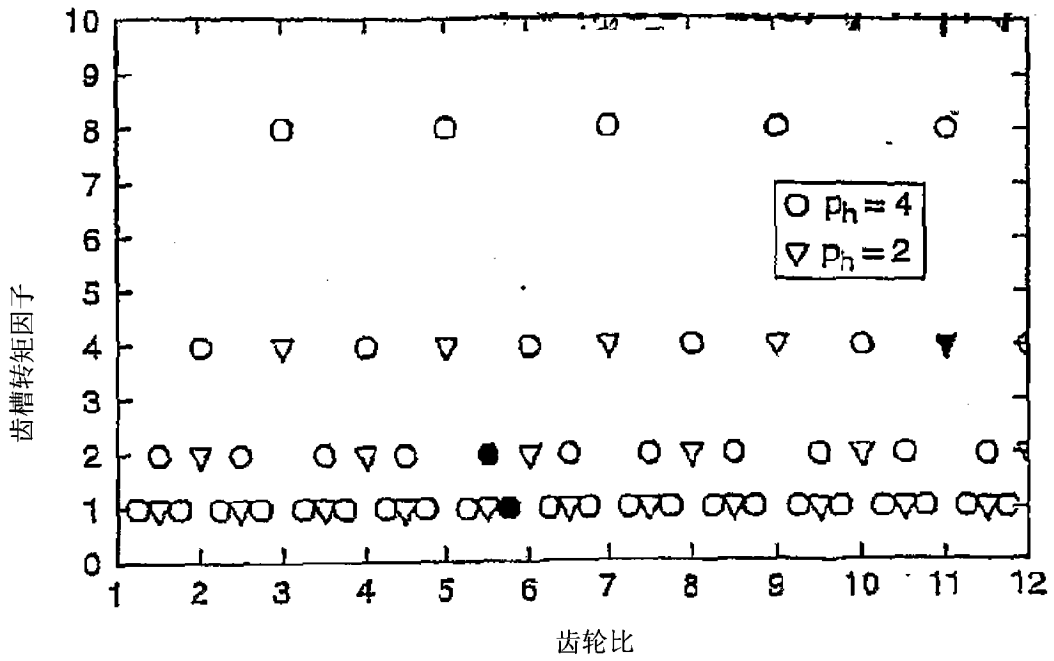
[0187] 图 14 传输转矩随低速转子的角度位置的变化

[0188]



[0189] 图 15 对于高速转子上奇数数量的极—对，齿槽转矩因子随齿轮比的变化

[0190]



[0191] 图 16 对于高速转子上偶数数量的极—对，齿槽转矩因子随齿轮比的变化

[0192] 实心符号表示图 2 中的 5.5:1、5.75:1 和 11:1 的齿轮设计

[0193] 3.1 磁通密度波形

[0194] 图 4—6 分别示出对于 5.5:1、5.75:1 和 11:1 的磁性齿轮比的、由在与低速和高速转子相邻的气隙中的高速转子永久磁铁引起的磁通密度的径向分量的变化，以及它们相应的 空间谐波谱。相似地，图 7—9 分别示出对于 5.5:1、5.75:1 和 11:1 的磁性齿轮比的、由在与高速和低速转子相邻的气隙中的低速转子永久磁铁引起的磁通密度的径向分量的变化，以及它们相应的空间谐波谱。清楚地，铁磁极靴的存在导致许多异步空间谐波，即，$k \neq 0$，其最大的一个空间谐波 ($m = 1$、$k = -1$) 具有与其它永久磁铁转子的极的数量相同的极数。还可以看到，在与其它转子相邻的气隙中，从一个转子上的永久磁铁产生的异步空间谐波，即 $k \neq 0$，是显著地更大的。

[0195] 3.2 转矩传输

[0196] 图 10—12 示出当与低速转子相邻的气隙的直径和低速和高速转子上的磁铁材料量保持不变的情况下，低速转子上的最大转矩如何随着静止极靴的径向厚度而改变。可以看到，存在导致最大转矩传输能力的极靴的最优径向厚度。还可以看到，低速和高速转子上的极—对 p_l 和 p_h 的数量以及静止极靴 n_s 的数量的组合的选择对于最大转矩传输能力具有显著影响。应该注意，当 $p_h \leqslant 6$ 时，为获得 5.75:1 的齿轮比，只存在 $p_h = 4$、$p_l = 23$ 和 $n_s = 27$ 的单种组合。

[0197] 3.3 转矩波动

[0198] 虽然前面的结果已经突出了主要磁性齿轮设计参数对于平均转矩传输能力的影响，考虑在转子上产生的转矩波动也是很重要的，因为这对性能有害。由转子永久磁铁与铁磁极靴的相互作用而产生转矩波动，即，齿槽转矩。图 13 和 14 分别示出当 5.5:1、5.75:1 和 11:1 的磁性齿轮正在传输最大平均转矩时，在转子相互相对设置时，高速转子和低速转子上传输转矩的变化。可以看到，虽然 5.75:1 磁性齿轮事实上传输无波动的转矩，并且 5.5:1 磁性齿轮的转矩波动与平均传输转矩相比是相当小的，但是 11:1 磁性齿轮的转矩波动是

极明显的。

[0199] 对于 5.75:1 磁性齿轮，高速转子上的极数量，$2\times p_h = 8$，以及铁磁极靴的数量，$n_s = 27$，之间的最小公倍数是 $N_c = 216$。相似地，对于 5.5:1 磁性齿轮，高速转子上的极数量，$2\times p_h = 8$，以及铁磁极靴的数量，$n_s = 26$，之间的最小公倍数是 $N_c = 104$，这表示齿槽转矩波形的基波阶数 (fundamental order)，如可从图 13 清楚地看到。对比之下，对于 11:1 磁性齿轮，高速转子上的极数量，$2\times p_h = 4$，以及静止极靴的数量，$n_s = 24$，之间的最小公倍数仅是 $N_c = 24$，这是 11:1 磁性齿轮的高速转子上的明显高的齿槽转矩的原因。可从图 13 清楚地看到，阶数 $N_c = 24$ 的基波以及 $2\times N_c = 48$ 阶的二次谐波是 11:1 磁性齿轮的齿槽转矩波形中的主要分量。

[0200] 上述内容与定义了齿槽转矩因子 $2pn_s/n_c$ 的 [5] 符合。因此，最小公倍数 N_c 越大，极数就越少，较小的是齿槽转矩的幅度。

[0201] 图 15 和 16 示出当改变高速转子上的极—对的数量时高速转子的齿槽转矩因子是如何随齿轮比变化的。清楚地，在图 16 中给出的齿槽转矩因子的值和图 13 和 14 中预测的转矩波动水平之间存在较好的相关性。还值得注意的是，对于给定的齿轮比，高速转子和低速转子的齿槽转矩因子是相同的。还可以看到，可以实现具有低转矩波动的较宽的齿轮比范围。

[0202] 4. 样品磁性齿轮

[0203] 已经有了显示出实质上无波动的转矩传输能力的、具有 $p_h = 4$、$p_1 = 23$ 和 $n_s = 27$ 的 5.75:1 磁性齿轮的样机。在其机械设计和制造期间，对于静止铁磁极靴给予特别的考虑，由于 :首先它们会经受到随时间而变化的磁场。因此，为了避免过度的涡流损耗，必须使用经层叠的、经烧结的或组合的软磁性材料。其次，它们代表磁性齿轮的机械接地。因此，它们必须具有足够的机械强度来传输最大的转矩。

[0204] 磁性齿轮样机具有 140mm 的有效直径和 50mm 的有效轴向长度，并且使用具有 20℃ 时为 1.25T 的剩磁的经烧结的 NdFeB 永久磁铁，以及用于每个转子的护铁和静止的极靴的 0.35mm 的 3％ SiFe。图 17 示出制造层叠的极靴期间的各个阶段，以及测试台上经组装的磁性齿轮。

[0205] 图 18 示出对于不同的高速转子速度，齿轮的测量的效率是如何随低速转子上的传输转矩而变化的。可以看到，对于大于 75％的～ 60Nm 的测量的失步转矩的传输转矩值，效率超过 97％。应该注意，测量的失步转矩比从两—维静磁有限元件分析法预测的失步转矩要小～ 30％。这可能是由于下述的因素引起的 :第一，在一个转子上的永久磁铁看到的有效磁气隙包括静止极靴结构和内和外转子之间的物理气隙，以及另一个转子上的永久磁铁的径向厚度。因此，这相对于磁性齿轮的有效轴向长度是相当大的。因此，末端效应是很明显的，并且对于这些需要三—维静磁有限元件分析法。

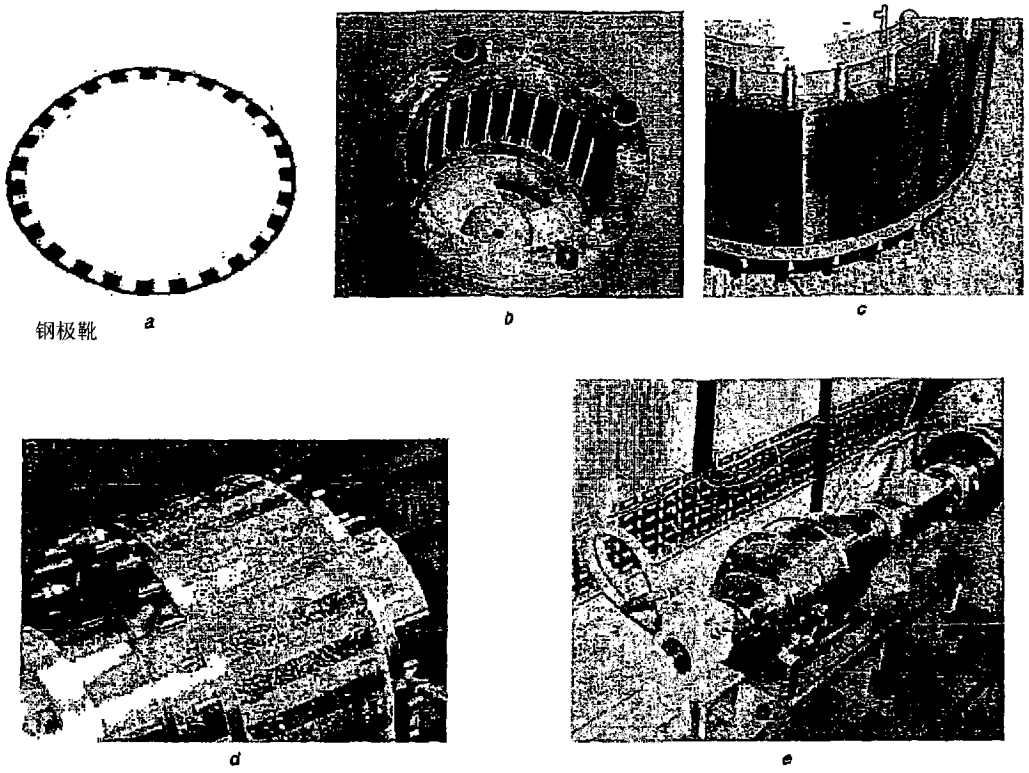
[0206] 第二，静止极靴表示磁性齿轮的机械接地，因此，必须传输高速和低速转子转矩两者。

[0207] 因此，极靴结构的扭转刚性是极重要的，因为从末端到末端的 1° 相对机械扭转将导致相对于低速转子上永久磁铁的～ 23° 电的有效歪斜。因此，需要扭转刚性结构。

[0208] 为了示出具有与 5.75:1 磁性齿轮样机具有相同转矩密度 (即，$72kNm/m^3$) 的磁性齿轮与永久磁铁无电刷机组合的系统转矩密度是如何随齿轮比和无电刷机的转矩密度而

变化的，图 19 考虑了具有自然冷却的、强制空气冷却的和液体冷却的径向场永久磁铁无电刷机，10kNm/m^3、20kNm/m^3 和 30kNm/m^3 分别为其典型的转矩密度。可以看到，通过使用齿轮比在 5:1 和 10:1 之间的磁性齿轮以及传统的径向场无电刷机，可以实现可比拟于或更优于现有技术横向磁场电机的转矩密度（一般为 40—60kNm/m^3）的系统转矩密度，这提供了更加改进的功率因数的附加优点。

[0209]



[0210] 图 17 静止叠层极靴和组装的磁性齿轮样机的制造

[0211] a 步骤 1：对带有关于极靴的桥的叠层进行放电加工

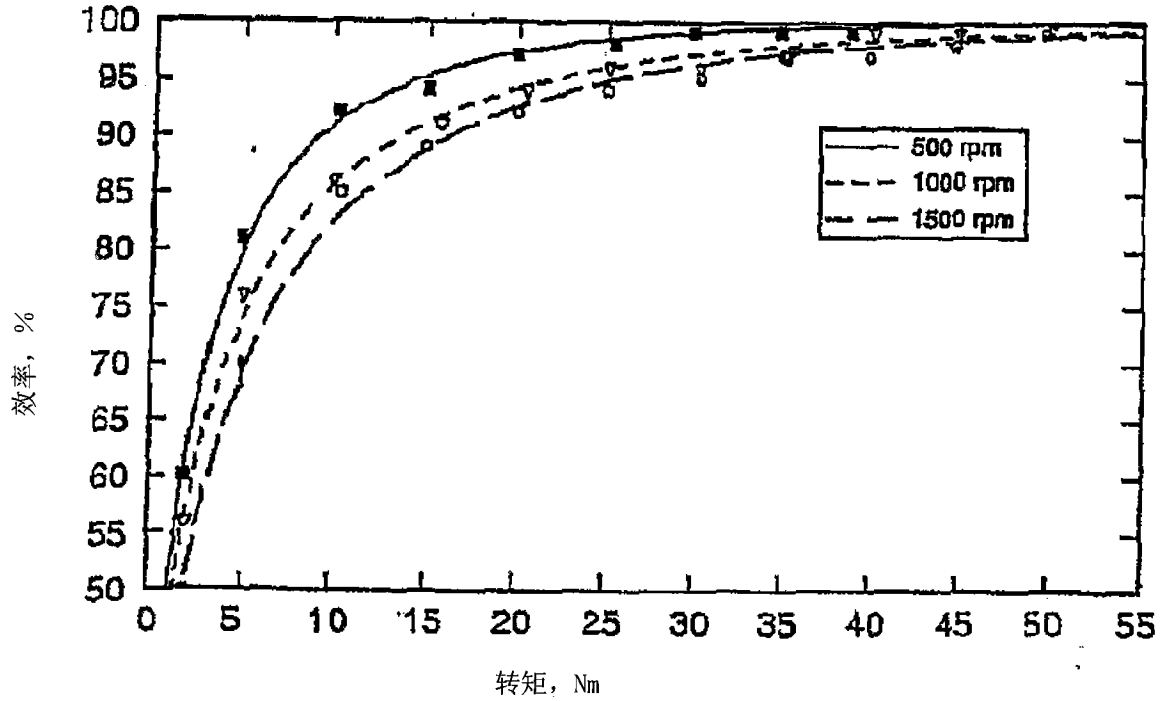
[0212] b 步骤 2：目的设计模型，使叠层堆叠中的槽填充高性能环氧树脂和用来提供适当轴向刚性的不锈钢钳杆

[0213] c 步骤 3：接着，加工而除去极靴之间的桥

[0214] d 步骤 4：加入玻璃纤维带以得到适当的径向刚性

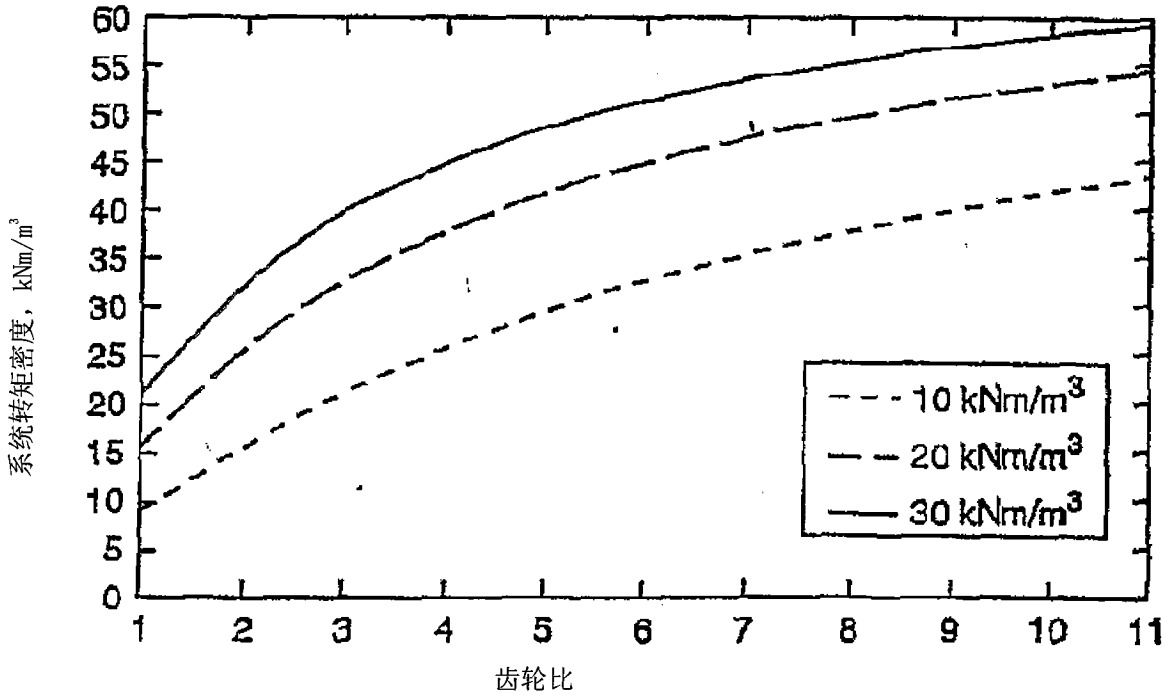
[0215] e 在测试台上组装磁性齿轮样机

[0216]



[0217] 图 18 对于不同的高速转子速度，磁性齿轮样机的效率随低速转子上传输转矩的变化

[0218]



[0219] 图 19 对于不同的电机转矩密度，系统转矩密度随齿轮比的变化

[0220] 5. 结论

[0221] 已经展示了高性能磁性齿轮布局，并且已经示出通过使用稀土磁铁，可以实现高的转矩密度。还已经示出，设计参数的选择对于转矩传输能力和转矩波动具有重要的影响，并且可以实现可比拟于或更优于现有技术横向磁场电机的系统转矩密度（即，组合的磁性齿轮和电机）。

[0222] 6. 答谢

[0223] 本文的作者感谢 UK Engineering and Physical Science Research Council(EPSRC) 授予研究许可 (GR/R46519)。

[0224] 7. 参考资料

[0225] 1 Hesmondhaigh, D.E., 和 Tipping D. :“多元件磁性齿轮 (A multielement magneticgear)”, IEE Proc.Elect.Power Appl., 1980, 127, 129-138 页, 。

[0226] 2 Tsurumoto, K. 和 Kikushi, S.,“使用永久磁铁的新的磁性齿轮 (A new magnetic gearusing permanent magnet)”, IEEE Trans.Magn, 1987, 23, (5), 3622-3624 页

[0227] 3 Ikuta, K., Makita, S. 和 Arimoto, S. :“用于传输机构的无接触磁性齿轮 (Non-contactmagnetic gear for transmission mechanism)”, Proc.IEEE Conf. 关于微型电机系统, MEMS91, Nara, Japan, 1991, 125-130 页

[0228] 4 Atallah, K. 和 Howe, D. :“新颖的高性能磁性齿轮 (A novel high-performancemagnetic gear)”, IEEE Trans.Magn, 2001, 37, (4), 2844-2846 页

[0229] 5 Zhu, Z.Q. 和 Howe, D. :“设计参数对永久磁铁机中齿槽效应转矩的影 (Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines)”, IEEETrans.Magn, 2000, 15, (5), 407-412 页

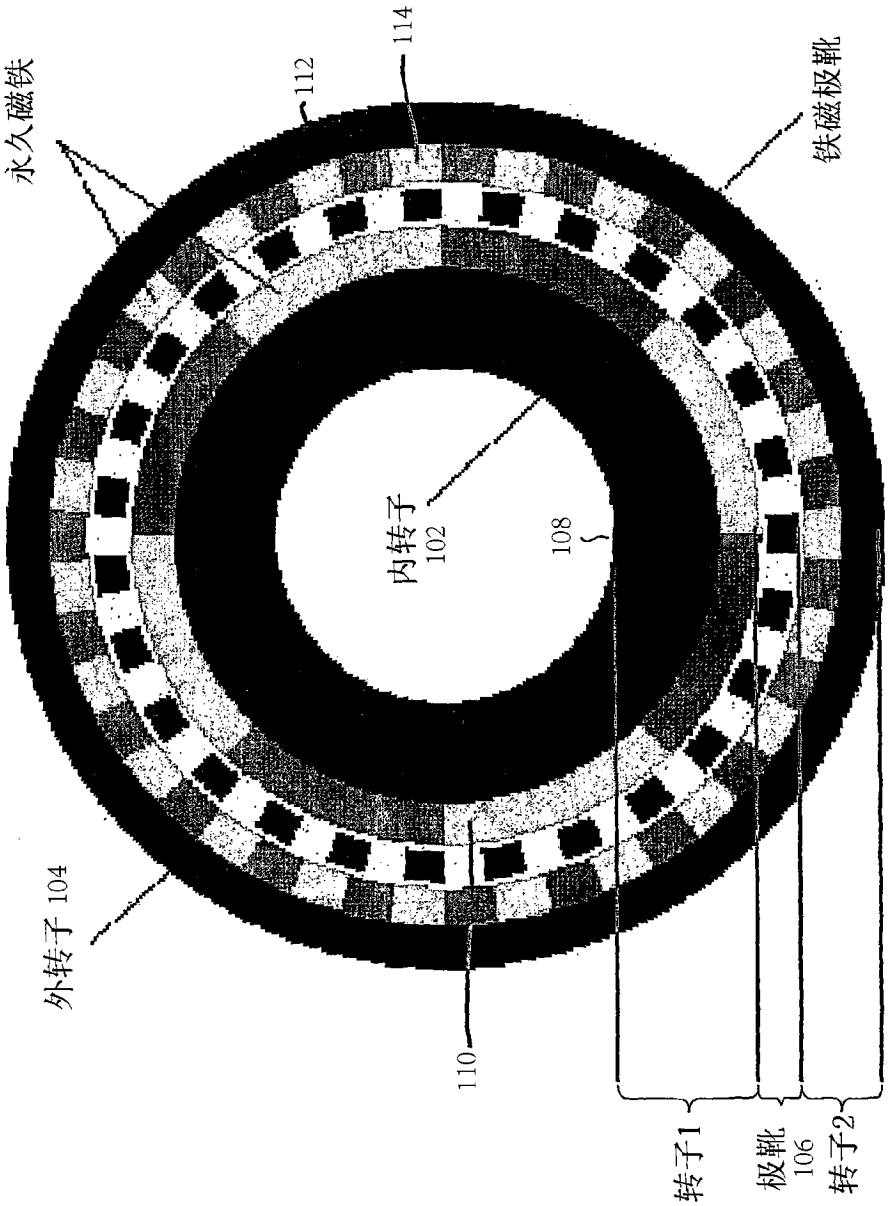


图1

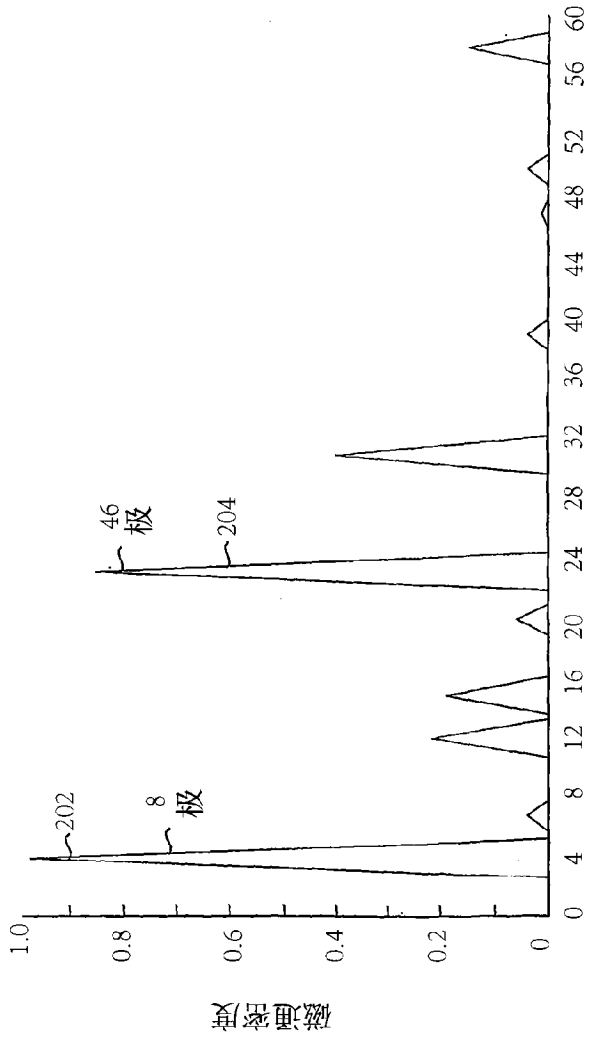

磁通密度
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60
极一对
200
202
8 极
46 极
204

图2

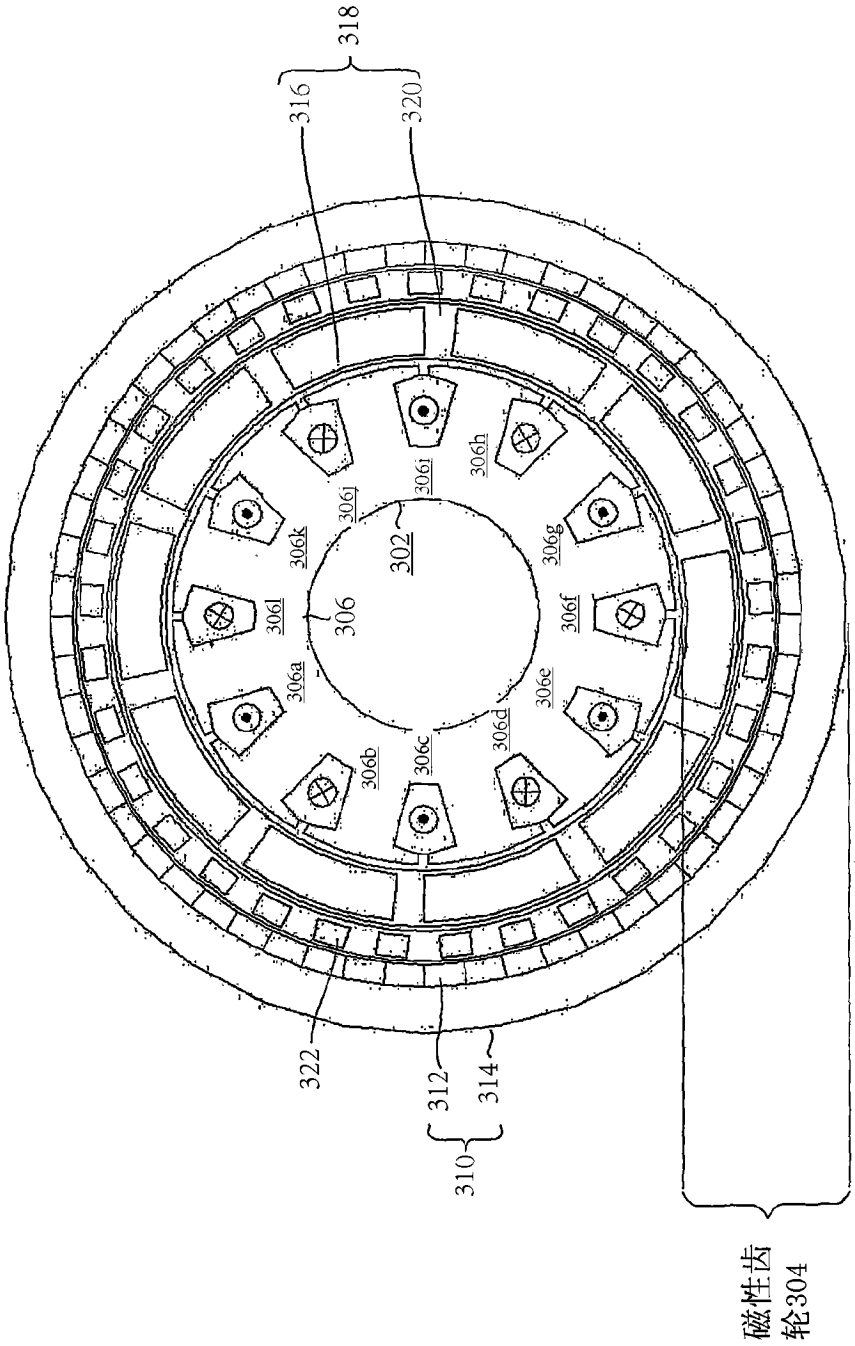

318
316
320
306j
306i
306h
306k
302
306g
306l
306
306f
306a
306e
306b
306c
306d
322
312
314
310
300
磁性齿轮304

图3

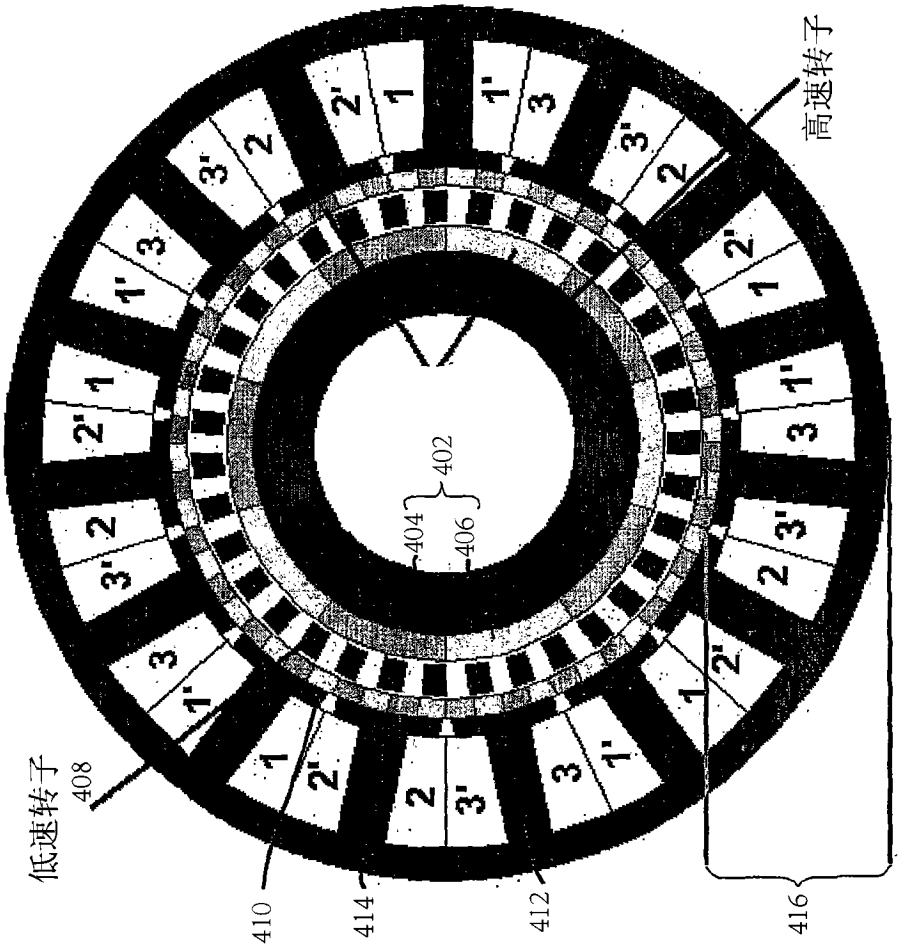


图4

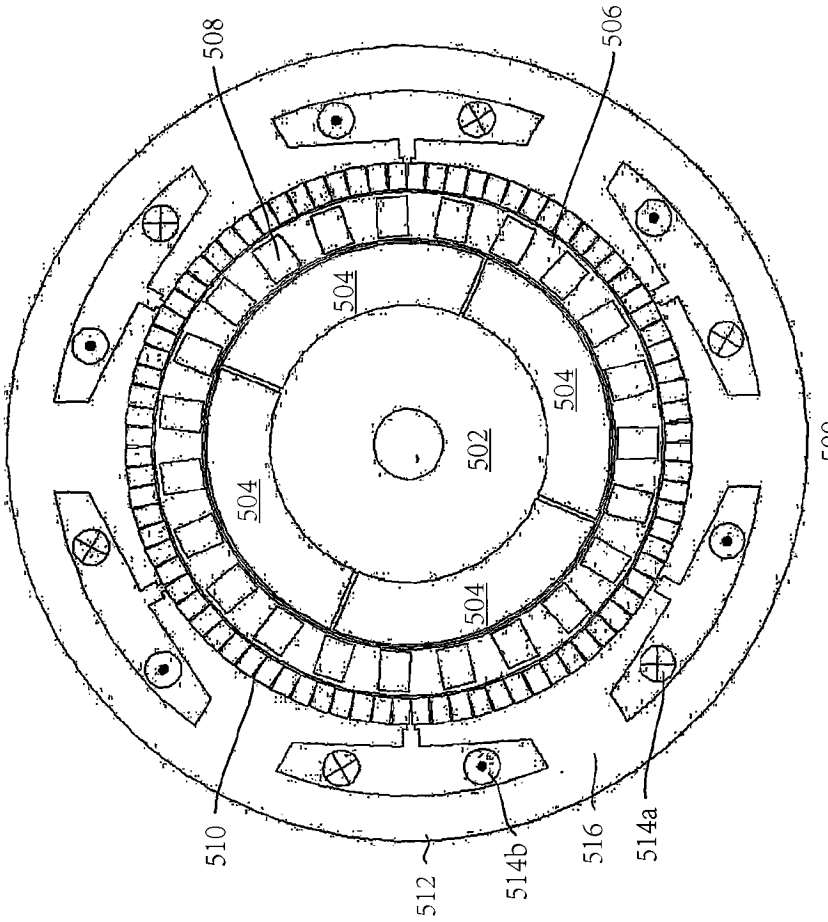
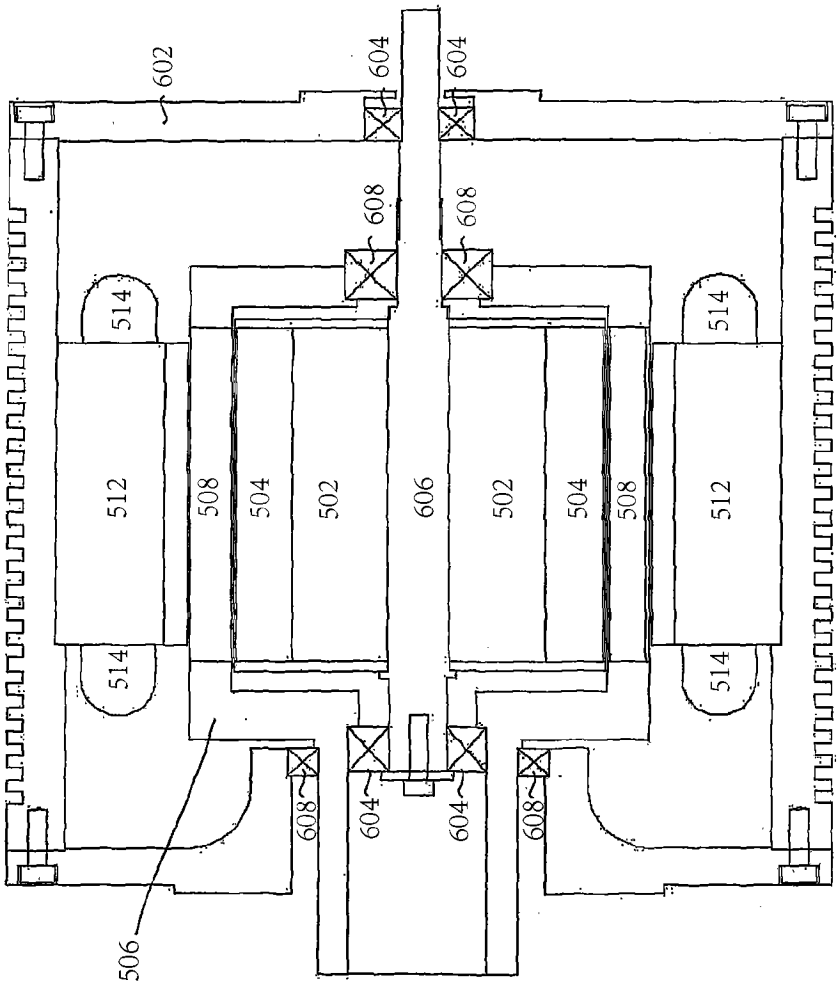


图5


602
604
604
608
608
514
514
512
508
504
502
606
502
504
508
512
514
514
608
604
604
608
506

600
图6

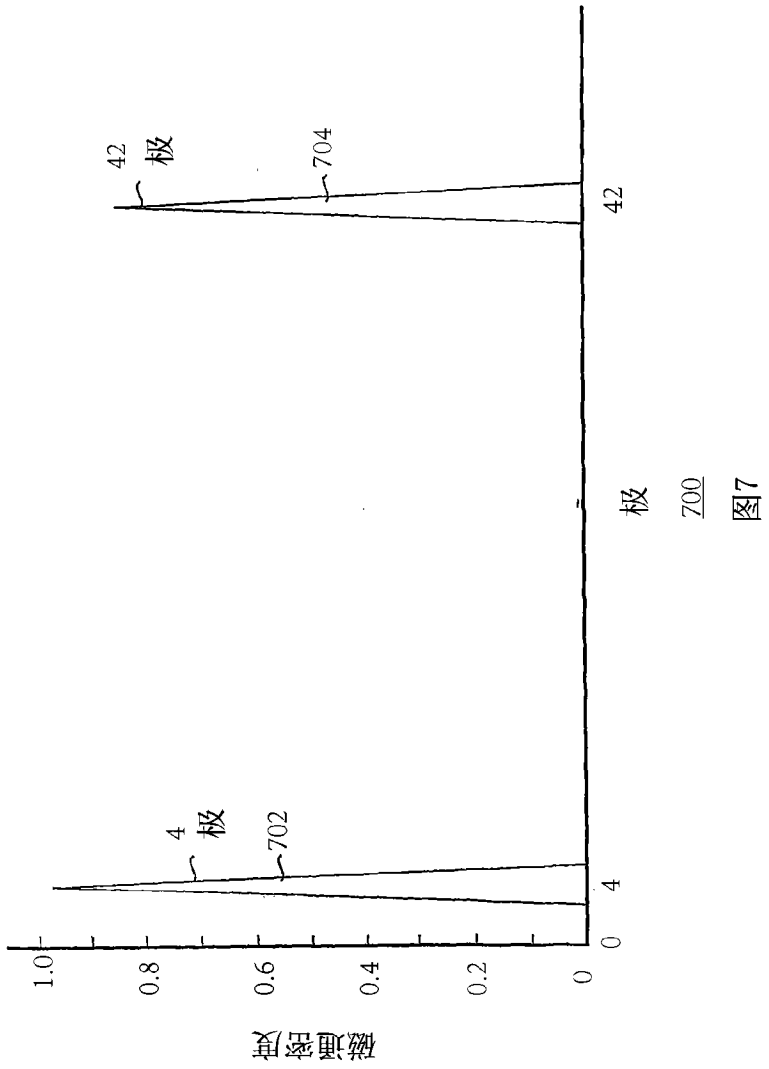
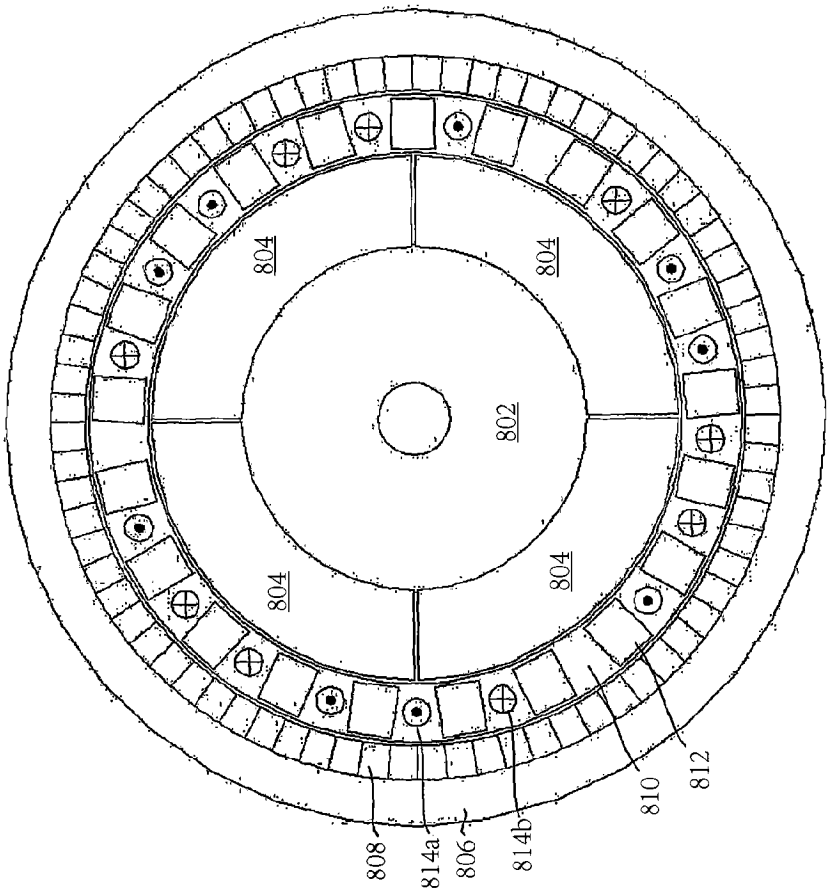


图7



800
图8

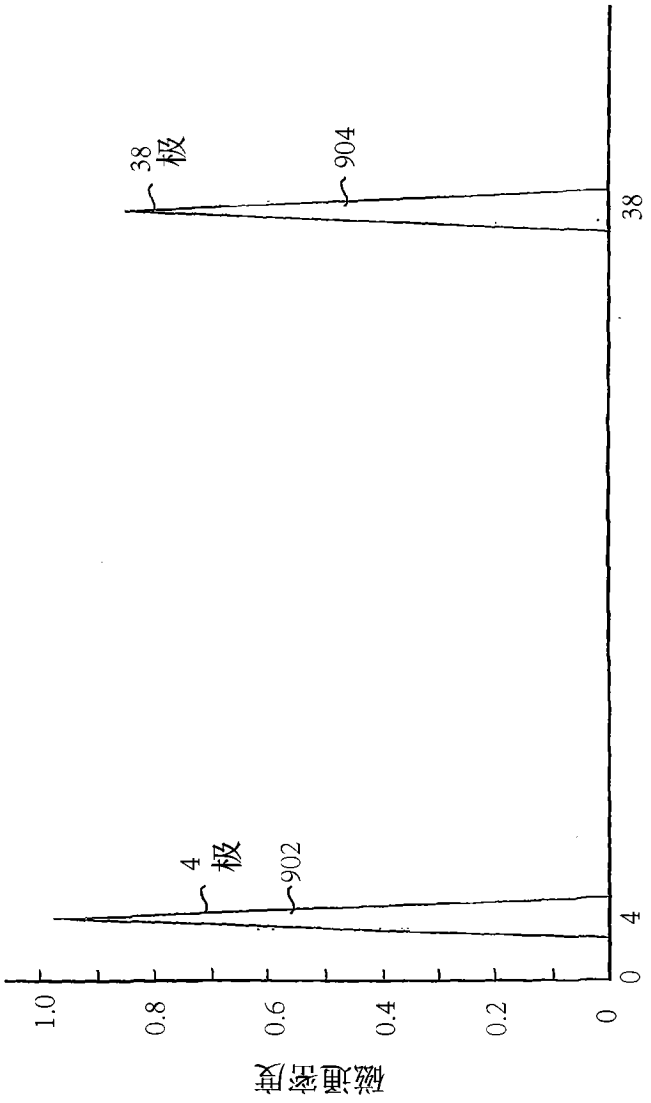


图9