(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)实用新型专利

(10)授权公告号 CN 202713100 U
(45)授权公告日 2013.01.30

(21)申请号 201220275840.5
(22)申请日 2012.06.13
(73)专利权人 江苏大学
地址 212013 江苏省镇江市京口区学府路301号
(72)发明人 刘国海 杨俊勤 赵文祥 陈前 瞿沥
(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200
代理人 楼高潮
(51)Int.Cl.
H02K 21/22(2006.01)
H02K 1/27(2006.01)
H02K 3/28(2006.01)
H02K 1/14(2006.01)

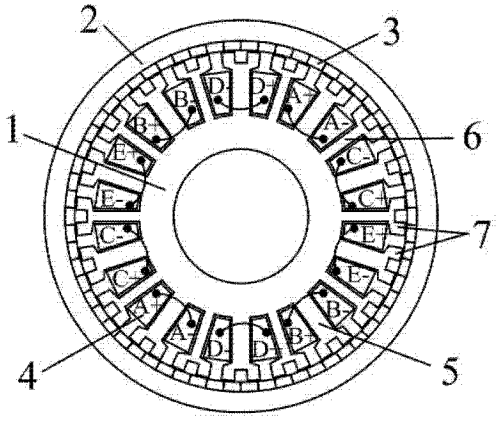
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 4 页

(54)实用新型名称

一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机

(57)摘要

本实用新型公开了一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机，包括同轴的内定子和外转子，永磁体沿圆周方向固定贴于外转子的内表面上，永磁体的充磁方向为径向且N极和S极交替排列，内定子圆周上布置彼此相交错的10个电枢齿和10个容错齿，电枢齿上绕有单层集中电枢绕组，径向相对两电枢齿上的集中电枢绕组串联成一相，电枢绕组为五相绕组；电枢齿的齿宽和容错齿的齿宽不相等，在电枢齿和容错齿的齿顶上设有沿圆周方向上均匀分布的40个调制极；在大幅度提高了转矩密度的同时保留并加强了容错性能，有助于减小电机体积，提高电机可靠性和带故障运行能力。



CN 202713100 U

1. 一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机，包括同轴的内定子（1）和外转子（2），其特征是：内定子（1）和外转子（2）之间设置永磁体（3）、电枢绕组（4）、电枢齿（5）、容错齿（6）和调制极（7），永磁体（3）沿圆周方向固定贴于外转子（2）的内表面上，永磁体（3）的充磁方向为径向且 N 极和 S 极交替排列，内定子（1）圆周上布置彼此相交错的 10 个电枢齿（5）和 10 个容错齿（6），电枢齿（5）上绕有单层集中电枢绕组（4），径向相对两电枢齿（5）上的集中电枢绕组（4）串联成一相，电枢绕组（4）为五相绕组；电枢齿（5）的齿宽和容错齿（6）的齿宽不相等，在电枢齿（5）和容错齿（6）的齿顶上设有沿圆周方向上均匀分布的 40 个调制极（7）；每两个调制极（7）之间是间隔分布的槽口（9）和小槽（10），槽口（9）与电枢齿（5）和容错齿（6）形成的齿间槽（8）相通，小槽（10）设于电枢齿（5）和容错齿（6）上，小槽（10）的宽度、槽口（9）的宽度和调制极（7）的宽度三者相等，小槽（10）的深度、槽口（9）的深度和调制极（7）的高度均相等。

2. 根据权利要求 1 所述的一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机，其特征是：调制极数 n_s、电枢绕组（4）的极对数 p_1 和永磁体（3）的永磁体极对数 p_2 三者满足关系式：$p_2 = kn_s - mp_1$，$p_1 = 1$，$m = 1,3,5\cdots$，$k = 0, \pm1, \pm2, \cdots$。

3. 根据权利要求 2 所述的一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机，其特征是：$k = 1$，$m = 9$。

4. 根据权利要求 1 所述的一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机，其特征是：在保证磁力线完全通过容错齿（6）的前提下最大限度增大齿间槽（8）的面积。

一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错电机

技术领域

[0001] 本实用新型涉及电工、电机、电动汽车领域，特指一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错型游标电机。

背景技术

[0002] 随着日益增长的油价以及环境污染危机，电动汽车开始受到越来越广泛的关注。不同于传统汽车，电动汽车的推进系统主要采用高性能的电机驱动，因此，电机是决定电动汽车效率和性能的关键部件。

[0003] 相比于现有电励磁电机或者有刷直流电机驱动系统，永磁无刷电机拥有高效率、结构简单紧凑、运行可靠、体积小和重量轻等优点。随着具有外转子结构的轮毂电机的出现，电机与车轮间的机械连接得以取消，大大提高了整车效率和可靠性，轮毂式永磁容错电机具有高稳定性和带故障运行能力。

[0004] 众所周知，电动汽车运行在爬坡等低速运动场合时，往往需要通过机械齿轮变速以达到低速大转矩运行的效果，即兼顾电机高功率密度的设计要求与低速大转矩运行需要的矛盾。而轮毂式电机去除了机械连接，根据电机原理，转子转速越低，电机的体积、重量和制造成本就越大。永磁游标电机作为一种基于磁齿轮原理而产生的新型电机，它具有体积小，重量轻，输出转矩大，适用于低速大转矩应用场合等优点。

[0005] 现有技术中的永磁容错电机尽管具有高可靠性和高容错性能，但因其转矩密度不高(与普通永磁电机类似)，将其运用于直接驱动的电动汽车上时，电机体积受到轮胎大小限制，从而使其输出转矩也受到限制无法满足低速大转矩运行的需要。

[0006] 现有技术中的永磁游标电机均采用 3 相电枢绕组且每极每相槽数 $q = 1/2$ 的分数槽双层式集中绕组结构，首先 $q=1/2$ 的分数槽集中绕组由于其一个线圈两圈边在空间呈 120° 电角度，从而导致绕组因数不高(约为 0.866)，某种程度上降低了反电势和输出转矩。其次三相双层式的集中绕组不具备高容错性能，自互感比值低，导致相与相间耦合程度相对较高，当一相发生故障，该故障相产生磁场将会严重影响其他两正常相，导致系统无法正常工作不具备带故障运行能力。

发明内容

[0007] 本实用新型针对现有技术的不足进行设计，提出了一种低速大转矩的电动汽车用五相永磁容错型游标电机，目的在于在低速大转矩应用情况下相对于普通永磁容错电机提高了电机的转矩密度，从而减小了电机体积、重量和制造成本；而相对于永磁游标电机大幅提高容错性能，使其具备高可靠性以及带故障运行能力。

[0008] 为解决上述技术问题，本实用新型采用的技术方案为：包括同轴的内定子和外转子，内定子和外转子之间设置永磁体、电枢绕组、电枢齿、容错齿和调制极，永磁体沿圆周方向固定贴于外转子的内表面上，永磁体的充磁方向为径向且N极和S极交替排列，内定子圆周上布置彼此相交错的10个电枢齿和10个容错齿，电枢齿上绕有单层集中电枢绕组，径向

相对两电枢齿上的集中电枢绕组串联成一相，电枢绕组为五相绕组；电枢齿的齿宽和容错齿的齿宽不相等，在电枢齿和容错齿的齿顶上设有沿圆周方向上均匀分布的 40 个调制极；每两个调制极之间是间隔分布的槽口和小槽，槽口与电枢齿和容错齿形成的齿间槽相通，小槽设在电枢齿和容错齿上，小槽的宽度、槽口的宽度和调制极的宽度三者相等，小槽的深度、槽口的深度和调制极的高度均相等。

[0009] 进一步地，调制极数 n_s、电枢绕组的极对数 p_1 和永磁体的永磁体极对数 p_2 三者满足关系式 $p_2 = kn_s - mp_1$，$p_1 = 1$，$m = 1,3,5\cdots$，$k = 0,\pm1,\pm2,\cdots$。

[0010] 本实用新型采用上述技术方案后具有如下有益效果：

[0011] 1、采用外转子结构，车轮可与外转子很好集合在一起，省除了机械齿轮箱，提高了可靠性。同时减小了电机的体积，重量和制造成本。

[0012] 2、电枢绕组为每极每相槽数 $q<1/2$ 的分数槽集中式绕组，端部短，安装方便，且绕组因数高（约 0.96）。

[0013] 3、采用单层绕组，每槽只有一相绕组，无绕组的容错齿作为磁通回路，同时也对相间电路、磁路和温度进行解耦。相与相间互感几乎为 0，自互感比达到 238 ： 1，当电机一相发生故障（短路或者开路）时，该相对其他相绕组影响非常小，实现了相间独立，提高了电机的可靠性和带故障运行能力。

[0014] 4、有效地结合了永磁容错电机和永磁游标电机的优点，在保留并进一步加强了容错性能的同时显著的增大了输出转矩，具有高转矩密度和高功率密度。

附图说明

[0015] 图 1 是本实用新型的结构示意图；

[0016] 图 2 是图 1 中电枢齿 5、容错齿 6、调制极 7 的局部放大图；

[0017] 图 3 是图 2 中电枢齿 5、容错齿 6、调制极 7 的局部展开图；

[0018] 图 1-3 中：1. 内定子；2. 外转子；3. 永磁体；4. 绕组；5. 电枢齿；6. 容错齿；7. 调制极；8. 齿间槽；9. 槽口；10. 小槽；A. 小槽 10 的宽度；B. 调制极 7 的宽度；C. 槽口 9 的宽度；D 小槽 10 的深度。

[0019] 图 4 是本实用新型气隙磁密空间分布图；

[0020] 图 5 是本实用新型空载反电势随 m 值变化而变化图；

[0021] 图 6 是本实用新型自感和互感对比图；

[0022] 图 7 是本实用新型输出转矩与同体积永磁容错电机比较图。

具体实施方式

[0023] 参照图 1，本实用新型包括内定子 1、外转子 2、永磁体 3、电枢绕组 4、电枢齿 5、容错齿 6 和调制极 7。内定子 1 和外转子 2 同轴，在内定子 1 和外转子 2 之间设置永磁体 3、电枢绕组 4、电枢齿 5、容错齿 6 和调制极 7。沿外转子 2 内表面的圆周方向上，永磁体 3 固定贴在外转子 2 的内表面上，永磁体 3 的材料为钕铁硼，充磁方向为径向，永磁体 3 的 N 极和 S 极交替排列。

[0024] 内定子 1 圆周上布置 10 个电枢齿 5 和 10 个容错齿 6，电枢齿 5 和容错齿 6 彼此相交错，电枢齿 5 上绕有单层集中电枢绕组 4，径向相对两电枢齿 5 上的集中电枢绕组串联成

一相绕组，本实用新型电枢绕组 4 为每极每相槽数 $q<1/2$ 分数槽集中绕组构成的五相绕组，具体是有 ABCDE 五相绕组在定子 1 的 10 个电枢齿 5 上呈 A、D、B、E、C、A、D、B、E、C 分布。电枢齿 5 和容错齿 6 采用不等齿宽，在保证磁力线完全通过容错齿 6 的前提下最大限度增大电枢齿 5 和容错齿 6 形成的齿间槽 8 的面积；在电枢齿 5 和容错齿 6 的齿顶上设置在定子圆周方向上等宽均匀分布的调制极 7，如附图 2。为细致描述调制极 7 的结构，参见附图 3 的横向展开图，每两个调制极 7 之间是间隔分布的槽口 9 和小槽 10，槽口 9 与齿间槽 8 相通，小槽 10 设置在电枢齿 5 和容错齿 6 的齿顶上，即，在电枢齿 5 和容错齿 6 上各开一小槽 10，保证小槽 10 的宽度 A、槽口 9 的宽度 C 和调制极 7 的宽度 B 三者相等，即 A = B = C，小槽 10 的深度、槽口 9 的深度和调制极 7 的高度均相等，为图 3 中的 D，如此最终形成在定子外圆周等宽均匀分布的 40 个调制极 7，即 $n_s = 40$。

[0025] 根据图 1 绕组分相可知，定子电枢单相绕组基波极对数为 1，即电枢绕组 4 的基波极对数为 1，即定子电枢绕组极对数 $p_1 = 1$。调制极数 n_s、定子电枢绕组极对数 p_1 和永磁体 3 的永磁体极对数 p_2 三者满足关系式 $p_2 = kn_s - mp_1$，$m = 1,3,5\cdots$，$k = 0,\pm1,\pm2,\cdots$。为得到空间最大的谐波磁场，取其中 $k = 1$，$m = 9$，从而得到永磁体极对数为 31。

[0026] 电枢绕组 4 采用每极每相槽数 $q<1/2$ 的分数槽集中绕组结构，槽数为 20，mp_1 为 9，$q = 20/5/18 = 2/9$，最大限度增大了绕组因数，从而增大了绕组反电势。

[0027] 当内定子电枢绕组 4 通以交流电时，产生电枢磁场，其旋转角速度为 $-\omega_2$，经过调制极 7 的调制作用，在气隙中产生一个调制波磁场，其旋转角速度为 ω_1，该速度与外转子 2 速度一致，从而使该磁场与转子永磁体作用产生力矩。ω_1 : ω_2 为转速变比，等于 mp_1 与 p_2 之比。

[0028] 本实用新型工作原理具体说明如下：具有 p_1 对极的电枢绕组产生的磁场以速度 ω_2 旋转时，磁场经过调制极 7（个数为 n_s）调制后，在气隙中形成空间分布磁场，该磁场在半径为 r，空间角度为 θ 处的磁感应强度径向分量 B_r 可表示为：

[0029]

$$B_r(r,\theta) = \lambda_{r0}(r)\sum_{m=1,3,5,\ldots} b_{rm}(r)\cos(mp_1(\theta-\omega_2 t)+mp_1\theta_0)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,5,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{rj}(r)b_{rm}(r)\cos\left((mp_1+jn_s)\left(\theta-\frac{mp_1\omega_2}{mp_1+jn_s}t\right)+mp_1\theta_0\right)$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1,3,4,\ldots}\sum_{j=1,2,3,\ldots}\lambda_{rj}(r)b_{rm}(r)\cos\left((mp_1-jn_s)\left(\theta-\frac{mp_1\omega_2}{mp_1-jn_s}t\right)+mp_1\theta_0\right)$$

[0030] 其中：b_{rm} 是径向磁密分布的傅里叶系数，λ_{rj} 是径向调制函数的傅里叶系数；t 为时间变量；θ_0 为初始空间相位角。

[0031] 从公式可得出磁密分布空间的谐波极对数与转速比有如下表示：

$$p_2 = |mp_1 + kn_s|$$

[0032]

$$G_r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{|mp_1+kn_s|}{mp_1} \qquad m = 1,3,5\cdots,\ k = 0,\pm1,\pm2,\cdots$$

[0033] 由于本实用新型特殊的分相方式导致当 $k = -1$，$m = 9$ 时所对应的空间调制谐波磁场幅值最大。为在不同转速下稳定的传递转矩和能量，外转子 2 上永磁体 3 的极对数就必须等于 p_2。进而可得到高速电枢磁场与外转子永磁体 3 磁场转速比 ω_2 : ω_1 = p_2 : mp_1。

[0034] 附图 4 为本实用新型电机的气隙磁密空间分布图，由于调制极 7 的引入，使得气隙 1 个机械周期 360° 磁密呈现永磁体极对数 31 对分布（31 个波峰或波谷），同时也对应了定子 1 电枢磁场 mp_1（$m = 9$，$p_1 = 1$）对极分布（9 处波峰或出现下凹），证实了调制极 7 对磁场的调制作用。

[0035] 附图 5 为本实用新型电机空载反电势随 m 值变化而变化图，可看出 $m = 7$ 和 $m = 13$ 几近重合，同时 $m = 9$ 和 $m = 11$ 也几近重合，显然只有当 m 取 9 或 11 时，能得到最大空间谐波分量，进而考虑到转速比能一定程度上正比于输出转矩，本实用新型选取 $m = 9$。

[0036] 附图 6 为本实用新型电机自感和互感对比图，通过容错齿 6 进行了相间解耦，互感占自感比为 0.42%，使得电机拥有极高的容错性能。

[0037] 附图 7 为本实用新型电机输出转矩与同体积下常规永磁容错电机比较图，引入调制极 7，通过调制极 7 对低速旋转的永磁磁场和高速旋转的电枢磁场的调制作用使得转子在转动很小的角度下磁力线分布变化很大的角度，从而输出更大的转矩。

[0038] 因此，本实用新型由于调制极 7 的引入，打破了传统永磁同步电机定子电枢绕组极对数必须等于转子永磁体极对数的法则，它能将高速旋转的电枢磁场主谐波在气隙内调制成能与低速旋转的转子永磁体磁场相匹配的谐波，从而能在槽数不增加的情况下增大永磁体极对数，而通常大极对数电机适用于低速大转矩场合。同时，强烈的调制作用使得电机漏磁增加，漏磁导致漏感的增大，从而使总自感增大，电感的增大能有效的抑制电机故障时产生的短路电流，进一步提高了电机的容错性能。

[0039] 本实用新型通过调制极 7 增大输出转矩的机理在于：其一，调制作用使内定子电枢磁场和外转子永磁体磁场的旋转速度产生 31 / 9 转速比，从而使转子在转动很小的角度下空间磁力线分布变化很大的角度，即可理解为转子转动 9° 磁力线空间分布转动 31°，显然，在低速下绕组线圈切割磁力线速度仍能很快，因而提高了输出转矩，适用于低速大转矩应用场合；其二，由于不需要通过增加槽数来增大极对数，使得有效槽面积能显著大于同体积的同大极对数的永磁容错电机，如此槽内绕组线圈数得到增大，从而提高了输出转矩。同体积下，电机输出转矩的大幅提高同时也就意味着在要求达到某一指定输出转矩情形下时，电机能相对于普通永磁容错电机减小体积，而单单只是通过在电枢齿 5 和容错齿 6 上开小槽 10 形成调制极 7（而非增大槽数等其他措施）就达到这一效果，可见同时也减小了重量和制造成本。另外，本实用新型采用圆周均匀分布的调制极 7 保证了电机磁路的对称性，不至于产生不平衡磁拉力，能保证电机工作的稳定性。

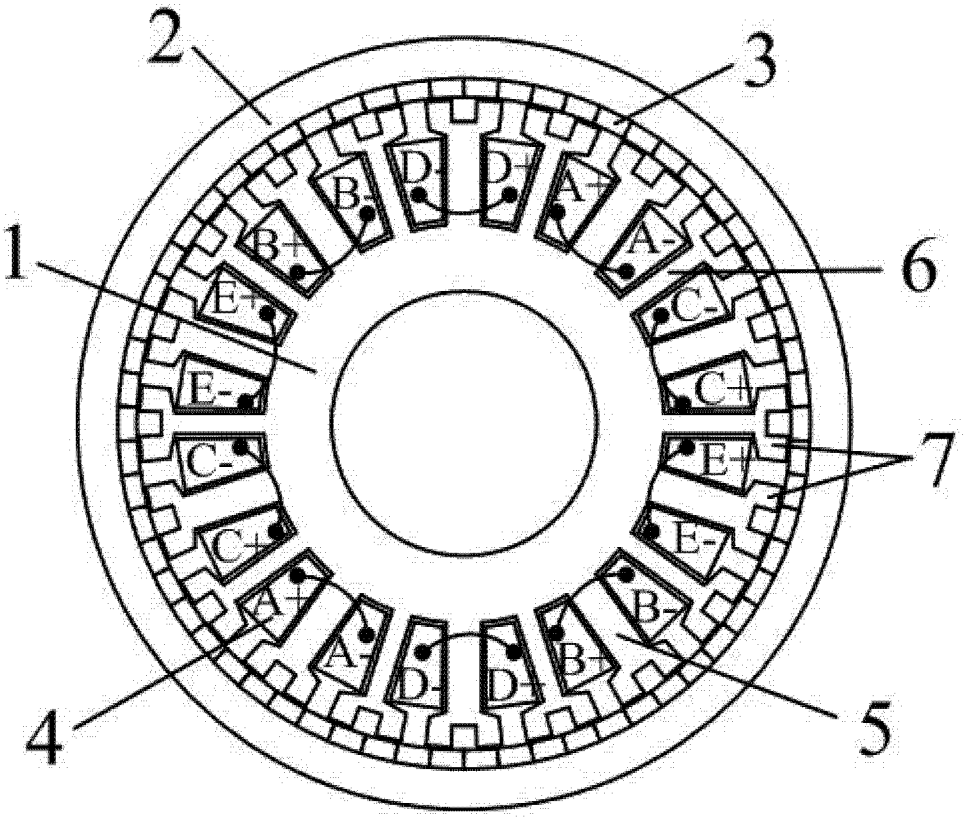


图 1

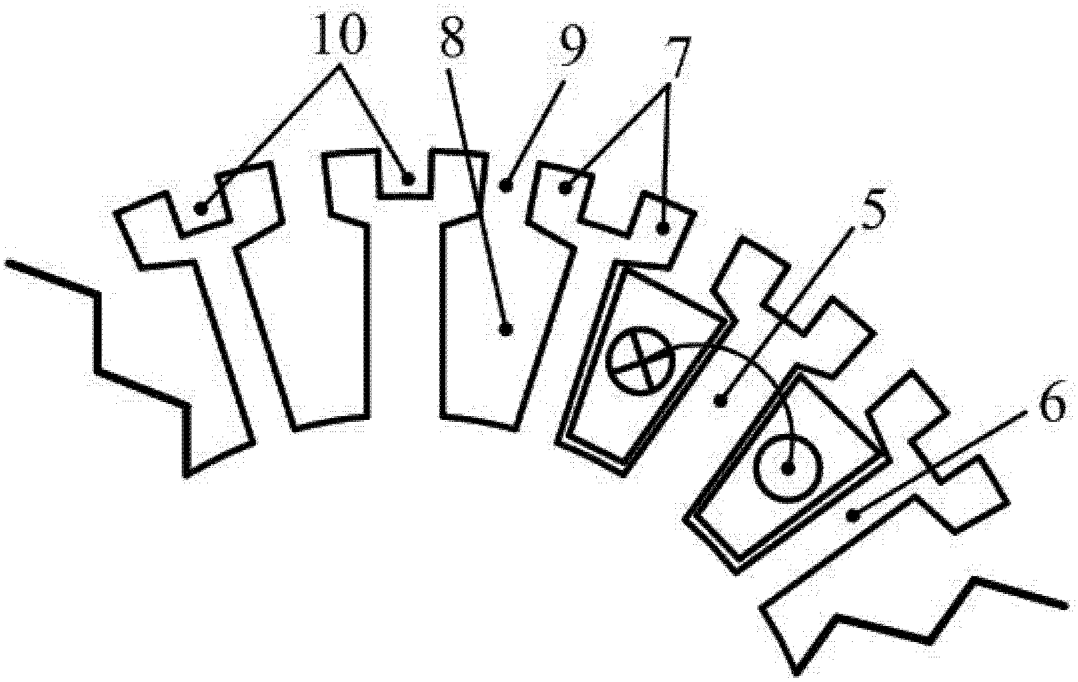


图 2

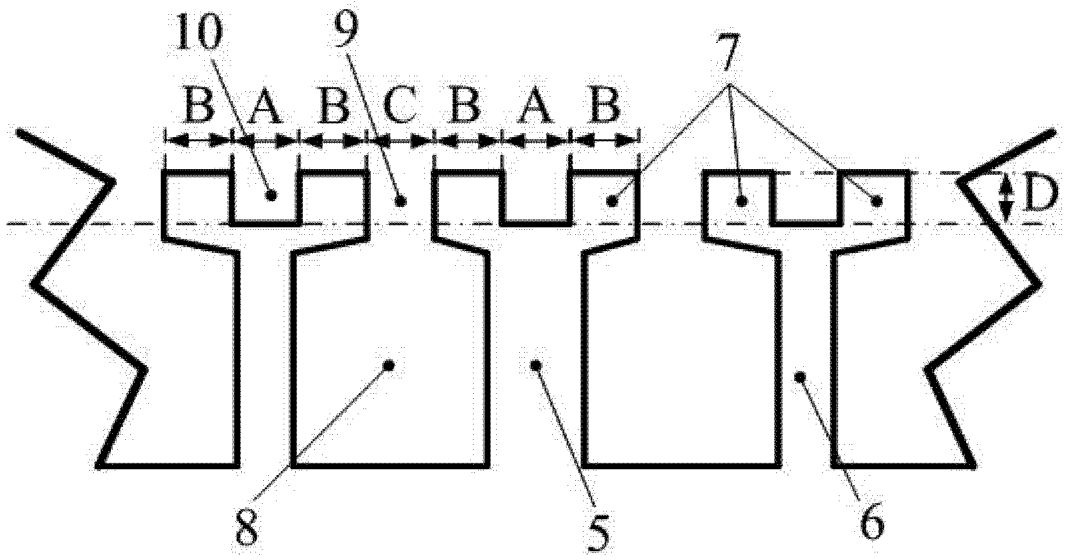

10
9
7
B A B C B A B
D
8
5
6

图 3

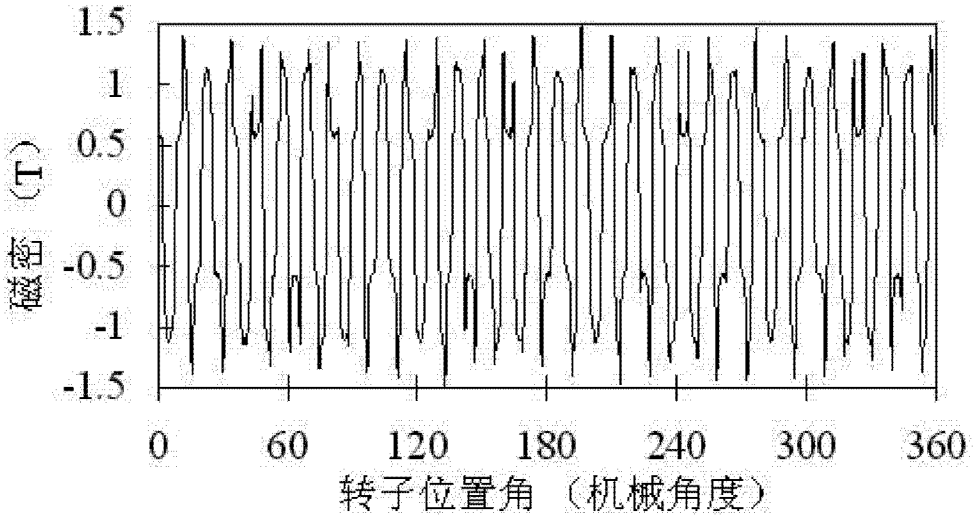

1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
磁密（T）
0
60
120
180
240
300
360
转子位置角（机械角度）

图 4

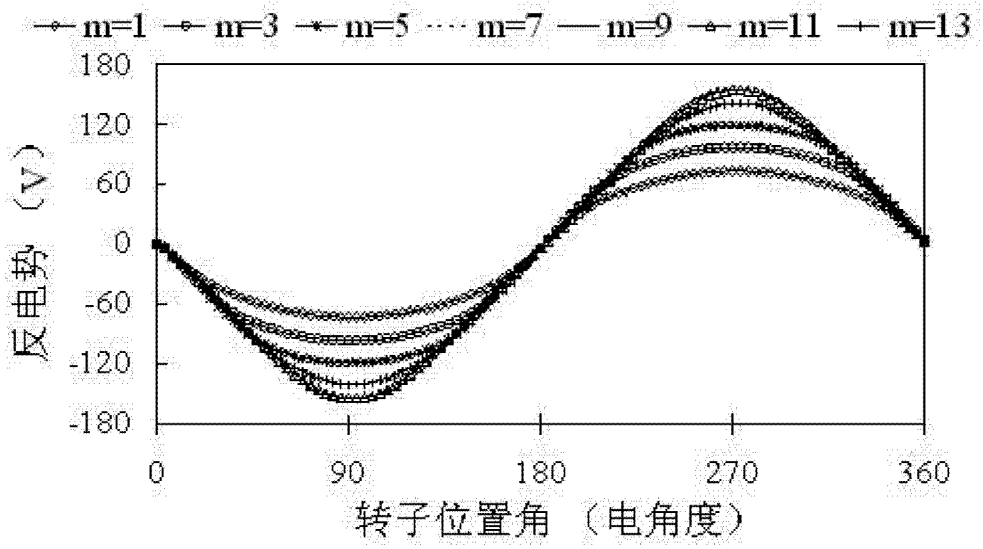

m=1
m=3
m=5
m=7
m=9
m=11
m=13
180
120
60
0
-60
-120
-180
反电势（V）
0
90
180
270
360
转子位置角（电角度）

图 5

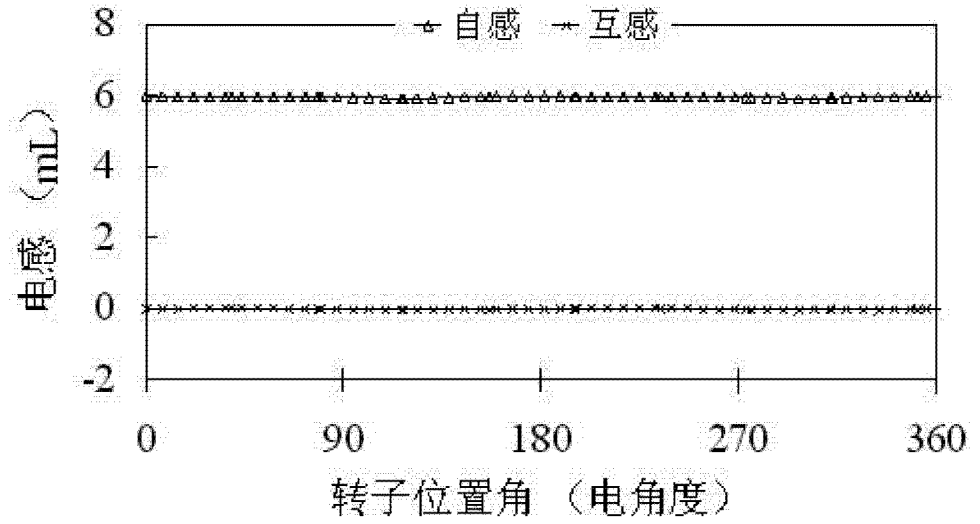

自感
互感
8
6
4
2
0
-2
电感（mL）
0
90
180
270
360
转子位置角（电角度）

图 6

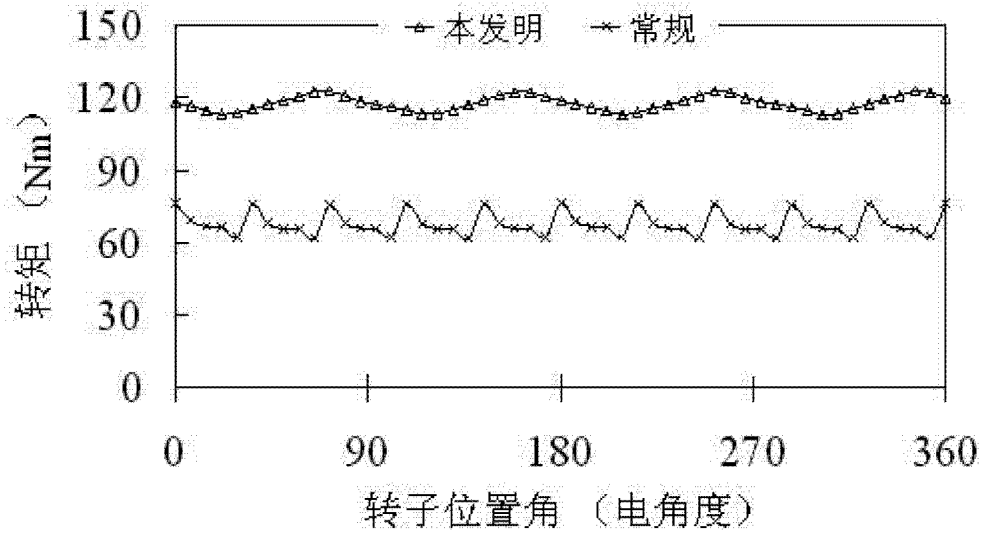


图 7