[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02K 1/16 (2006.01)
H02K 1/17 (2006.01)
H02K 15/03 (2006.01)

[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610041575.3

[43] 公开日 2007 年 3 月 28 日

[11] 公开号 CN 1937356A

[22] 申请日 2006.9.15
[21] 申请号 200610041575.3
[71] 申请人 江苏大学
地址 212013 江苏省镇江市丹徒路 301 号江苏大学内
[72] 发明人 孙玉坤 吉敬华 赵文祥 朱纪洪 刘国海 黄振跃
[74] 专利代理机构 南京知识律师事务所
代理人 汪旭东

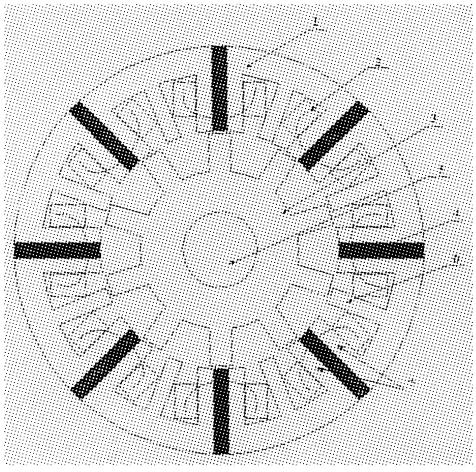
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 4 页

[54] 发明名称

定子永磁式双凸极容错电机

[57] 摘要

定子永磁式双凸极容错电机，涉及电工、电机技术领域。 本发明的创新点在于将定子铁心设计成山字形，每个铁心增加了一个容错齿。 山字型铁心两边的电枢齿和永磁体一起绕有绕组，容错齿上无绕组，径向相对的两极绕组相串联构成一相，相与相绕组之间通过容错齿隔离。 励磁磁场由永磁体产生，容错齿为永磁体和电枢绕组提供磁回路。 本发明使得电机相与相之间实现了电路、磁路和温度场的独立，具有较高的可靠性和带故障运行能力。 通过减小电机的齿槽宽度的方法，降低了转矩脉动。另外使电机的永磁体体积适中，电机铁心可以运行在磁化曲线的拐点。 该电机尤其适用于一些可靠性要求较高，如航空航天、军事领域、矿井轧钢等要求连续操作的高可靠性领域。



1、定子永磁式双凸极容错电机，由定子铁心构成，其特征在于：定子铁心（1）设计成山字形，每个定子铁心（1）增加了一个容错齿（6）,每槽只有一相绕组，容错齿上无绕组。

2、根据权利要求 1 所述的定子永磁式双凸极容错电机，其特征在于：容错齿（6）的极弧宽度$\beta_{sf}= 360^{\circ}/(6Zq)$，$q$ 为电机相数， Z 为每项极数。

3、根据权利要求 2 所述的定子永磁式双凸极容错电机，其特征在于：永磁体（4）的宽度h_m和电枢齿（7）极弧宽度β_{sw}为（$0.8 \sim 1.2$）β_{sf}，转子（8）极弧宽度取值范围为 $1.6\beta_{sf} \geq \beta_r \geq \beta_{sf}$。

定子永磁式双凸极容错电机

技术领域

本发明涉及电工、电机技术领域，特指一种新型定子永磁式双凸极容错电机。

背景技术

随着社会经济与科学技术的发展，电机驱动系统的应用领域不断扩大，如飞机、导弹及航天器等先进飞行器中得到越来越广泛应用的电动舵机（EMA），以及近年快速发展的电动汽车等对连续操作有较高要求的应用领域，在这些应用领域不仅要求电机体积小，重量轻，效率高，而且还要求电机可靠性高，容错能力强，免维护，以满足飞机、电动汽车能源有限、工作环境恶劣等特点。

开关磁阻电机具有结构简单坚固，采用集中绕组，端部连接短，可靠性高，具有较高的容错性能。因而，最早的被应用于容错式电机驱动系统，美国国家航空和航天局一直至力于研究将开关磁阻电机应用于航空航天领域。但是开关磁阻电机运行效率和材料利用率较低，与永磁电机相比功率密度较低。但是，传统的永磁电机（如永磁同步电机）由于采用了分布绕组其电路和磁路的耦合性较强，其带故障运行能力受到限制。为了将永磁电机的高功率密度和开关磁阻电机的高容错性相结合，英国的 B.C. Mecrow 等人于 1996 年提出了容错永磁电机的概念，该电机结构是将开关磁阻电机的结构模式与永磁同步电机相结合，将传统的永磁同步电机分布绕组改为集中绕组，且每个定子槽中只有一套绕组如附图 1 所示，没有绕组的电枢齿作为磁通回路同时也起着隔离的作用。集中绕组永磁容错电机相与相之间实现了电路、磁路以及温度的隔离，大大提高了电机的容错能力和可靠性。但是这种电机永磁体是一个整体套在轴上，电机的等效气隙很大，很难实现弱磁调速。而且永磁体安装在转子上不容易冷却，特别是在高速、高温的应用环境中。

相对于转子永磁型电机，定子永磁型电机由于将永磁体放在了定子上，永磁体制冷容易，且不需要考虑转子高速旋转时作用在永磁体上的离心拉力，提高了永磁体的可靠性。定子永磁同步电机典型的代表就是双凸极永磁电机。双凸极永磁电机是上世纪 90 年代中期由美国威斯康辛一麦迪逊大学的 Lipo 教授提出的，其基本结构与开关磁阻电机相似，转子无绕组，永磁体放置在定子轭部，永磁体的个数 $N=P/q$，P 为电机定子极数，q 为电机相数，为了使永磁体提供足够的励磁磁场，必须保证永磁体具有一定的体积，因此双凸极永磁电机电机体

积相对较大，如附图 2 所示。1997 年另一种双凸极式定子永磁型电机——磁通切换永磁电机被提出如附图 3 所示，磁通切换永磁电机永磁体的个数与定子极数相等及 N=P，永磁体的宽度与定子齿宽相等，这样永磁体的体积就被确定了。若要调整永磁体的励磁磁场，只能通过调整永磁体的磁能积。然而实验表明即使采用低磁能积的永磁体，电机磁场也很饱和，电机磁负荷较高，则高速运行涡流损耗较大。还有由于永磁体的比重大于硅钢片，过多的永磁体也增加了电机的重量。在相与相的独立性方面，双凸极永磁电机和磁通切换永磁电机相间耦合较为严重，电机的互感约为自感的一半，相独立性较差。

发明内容

本发明为了提高定子永磁型电机的容错性和功率密度，结合容错永磁电机提出了一种定子永磁式双凸极容错电机。

本发明在双凸极永磁电机的基础上，通过采用不同的定子齿结构和绕组连接方式，使得电机相与相之间实现了电路、磁路和温度场的独立，具有较高的可靠性和带故障运行能力。在此基础上，通过减小电机的齿槽宽度的方法，降低了转矩脉动。另外使电机的永磁体体积适中，电机铁心可以运行在磁化曲线的拐点。该电机尤其适用于一些可靠性要求较高，如航空航天、军事领域、矿井轧钢等要求连续操作的高可靠性领域。

本发明的基本结构与磁通切换永磁电机相同，定子由定子铁心和永磁体组成，永磁体沿圆周夹在铁心中间，铁心和永磁体与机座采用过盈配合，以保证铁心和永磁体的位置固定。转子上既没有绕组也没有永磁体，定转子铁心均由硅钢片叠压而成。绕有绕组的永磁体和电枢齿组合成一个整体。永磁体切向磁化并按照极性为 N、S、S、N、N、——S、S、N 的形式两两相对分布。

本发明的创新点在于将磁通切换永磁电机铁心和永磁体分开考虑，将磁通切换永磁电机 U 字形铁心，设计成山字形，每个铁心增加了一个容错齿。山字型铁心两边的电枢齿和永磁体一起绕有绕组，容错齿上无绕组，径向相对的两极绕组相串联构成一相，相与相绕组之间通过容错齿隔离。励磁磁场由永磁体产生，容错齿为永磁体和电枢绕组提供磁回路。

设 h_m 为永磁体宽度，β_{sw} 为绕有绕组的电枢齿极弧宽度，β_{sf} 为容错齿的极弧宽度，$\beta_{sf}=360°/(6Zq)$，q 为电机相数， Z 为每项极数。根据不同的电机尺寸，永磁体的宽度 h_m 和电枢齿极弧宽度 β_{sw} 可以在 $(0.8\sim1.2)\beta_{sf}$ 范围内进行调整，转子极弧宽度取值范围为 $1.6\beta_{sf}\geq\beta_r\geq\beta_{sf}$，以保证电机的反电势波形为较好的正弦形。而磁通切换永磁电机的永磁体宽度为 $h_m=\beta_{sw}=360°/(4Zq)$，因此与相同尺寸和极数的磁通切换永磁电机相比，定子永磁式双凸极容错电机的永磁体宽度、槽口宽度以及绕组的端部都减小了 1/3。

本发明具有以下有益效果：

1. 本发明继承了开关磁阻电机的优点，转子上无电刷、无永磁体、无绕组，可靠性高，高速性能好。定子上的电枢绕组为集中式绕组，端部短，安装方便。电枢绕组和永磁体均位于定子上，比较容易进行冷却设计。
2. 每个定子槽中只有一套绕组，没有绕组的容错齿作为磁通回路同时也起着隔离的作用。显然相与相之间实现了电路、温度的隔离。电机的某一相绕组由于发生短路故障时，其短路电流将导致温度急速上升，由于有容错齿的存在，不会引起磁钢以及其他相绕组温度的变化，因此实现了更好的独立性。
3. 容错齿为电枢绕组提供了磁回路使得电机的互感很小，近似于零。这表明每相之间的磁路也相互独立，因此当某相绕组发生故障时对其他相绕组影响甚小，提高了电机的可靠性和带故障运行能力。
4. 定子永磁式双凸极容错电机的永磁体宽度较磁通切换永磁电机减小了 1/3，另外容错齿增加了永磁体的磁回路，克服了双凸极永磁电机励磁磁场欠饱和，和磁通切换永磁电机磁场过饱和的弊端，可以使电机铁心运行在磁化曲线的拐点，降低了涡流损耗。
5. 永磁体用量的减少降低了电机的重量使得电机更适合在一些对重量要求较严格的场合如航空航天等领域。
6. 定子永磁式双凸极容错电机的齿槽宽度较磁通切换永磁电机减小了 1/3，可以显著降低永磁电机的定位转矩。
7. 电机反电势波形为正弦形，绕组可以通正弦交流电，矢量控制可以有效地应用于该电机，这也为基于矢量控制的容错智能控制策略的应用提供了可能。

附图说明

图 1 容错永磁电机结构简图

图 2 8/6 极双凸极永磁电机结构简图

图 3 磁通切换永磁电机结构简图

图 4 本发明结构简图

图 5 本发明单个山字形型铁心

图 6 本发明电感曲线

图 7 本发明与磁通切换永磁电机定位转矩比较 由图中可以看出本发明的定位转矩约为磁通切换永磁电机定位转矩的 1/6。

图 8 某相断路时本发明与磁通切换永磁电机转矩输出波形比较

以上图中有：1、定子铁心 2、绕组 3、转子铁心 4、永磁体 5、转轴 6、容错齿 7、电

枢齿 8、定子永磁式双凸极容错电机通额定电流时的自感 9、定子永磁式双凸极容错电机通额定电流时与相邻相的互感 10、定子永磁式双凸极容错电机电枢绕组电流为零时定位转矩 11、磁通切换永磁电机电枢绕组电流为零时定位转矩 12、定子永磁式双凸极容错电机某相断路时转矩波形 13、磁通切换永磁电机某相断路时转矩波形

具体实施方式

以一台四相定子永磁式双凸极容错电机为例，其截面图如附图 4 所示，定子由 8 个山字形定子铁心 1 和 8 个永磁体 4 组合而成。山字形定子铁心 1 和转子铁心 3 分别用厚度为 0.37mm 的硅钢片按图 5 所示的形状和图 4 所示的转子形状冲成冲片，用足够的冲片叠压成定子铁心 1 和转子铁心 3。定子绕组 2 为集中绕组，绕在夹有永磁体 4 的电枢齿上，且每槽只有一相绕组 2，径向相对的两极绕组 2 相串联构成一相，相与相绕组之间由容错齿 6 隔离，容错齿 6 上无绕组，无永磁体。

以下是一台额定功率 P_N=800W，额定转速 n_N=12000rpm，额定相电压峰值 110V，额定相电流 3.2A 的四相定子永磁式双凸极容错电机的主要设计数据：

定子铁心 1 外径 55m，转子铁心 3 内径 14mm，硅钢片叠片长 75mm，气隙长 0.5mm，容错齿 6 极弧宽度β_{sf}=7.5°，电枢齿 7 极弧宽度β_{sw}=0.9β_{sf}，永磁体 4 宽度 h_m=1.1β_{sf}，定子 1 极高 8mm，转子 3 极弧β_r=10°，转子 3 极高 6mm。每相绕组匝数为 48 匝。永磁体 4 采用稀土钕铁硼，尺寸为 10mmX75mmX2.4mm，永磁体切向充磁。

当转子旋转时，永磁体 4 产生的基波磁场在电枢绕组 2 中感应出四相正弦反电势，因此矢量控制的方法亦可以用于定子永磁式双凸极容错电机，当使电机电枢绕组 2 电流波形与反电势波形一致时，电机输出转矩脉动最小。通过先进的有限元电路磁路联合仿真计算软件对样机的电感和转矩进行了计算，当绕组通额定电流时电感波形如附图 6 所示，从图中可以看出电机的互感很小，实现了相与相之间的磁路隔离。附图 7 给出了四相定子永磁式双凸极容错电机与四相磁通切换永磁电机的定位转矩比较曲线，从图中可以看出永磁式双凸极容错电机的定位转矩约为磁通切换永磁电机定位转矩的 1/6。为了进一步验证定子永磁式双凸极容错电机的容错能力，附图 8 给出了定子永磁式双凸极容错电机和磁通切换永磁电机 A 相绕组开路时电机的转矩波形，从图中可以看出当某相绕组出现故障时定子永磁式双凸极容错电机仍然有较好的转矩输出，虽然平均转矩有所降低，转矩脉动有所增加，但是可以通过改变绕组电流的幅值和相位等容错控制策略加以优化。

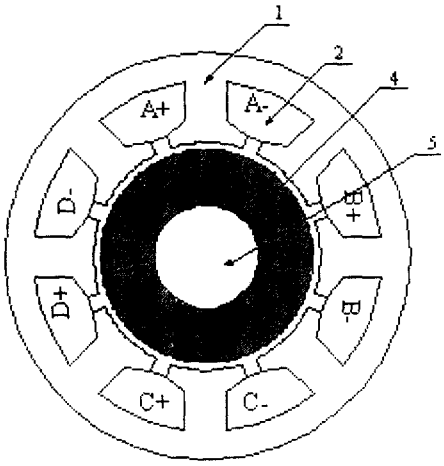


图 1

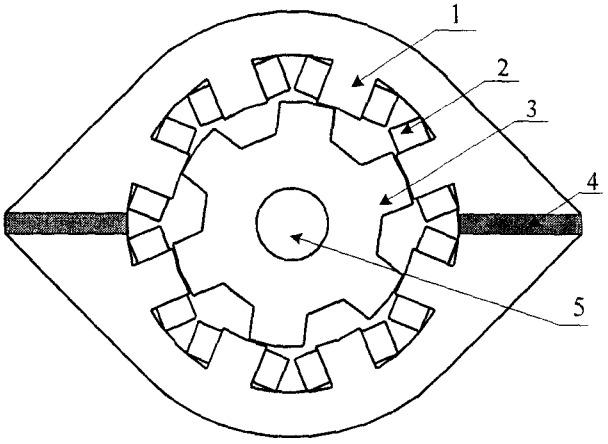


图 2

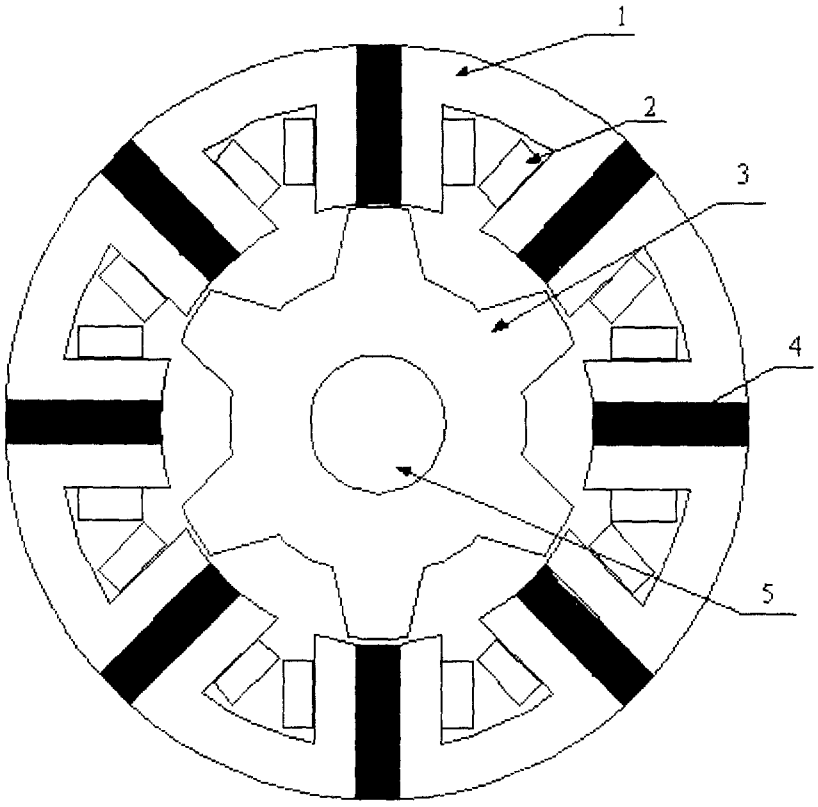


图 3

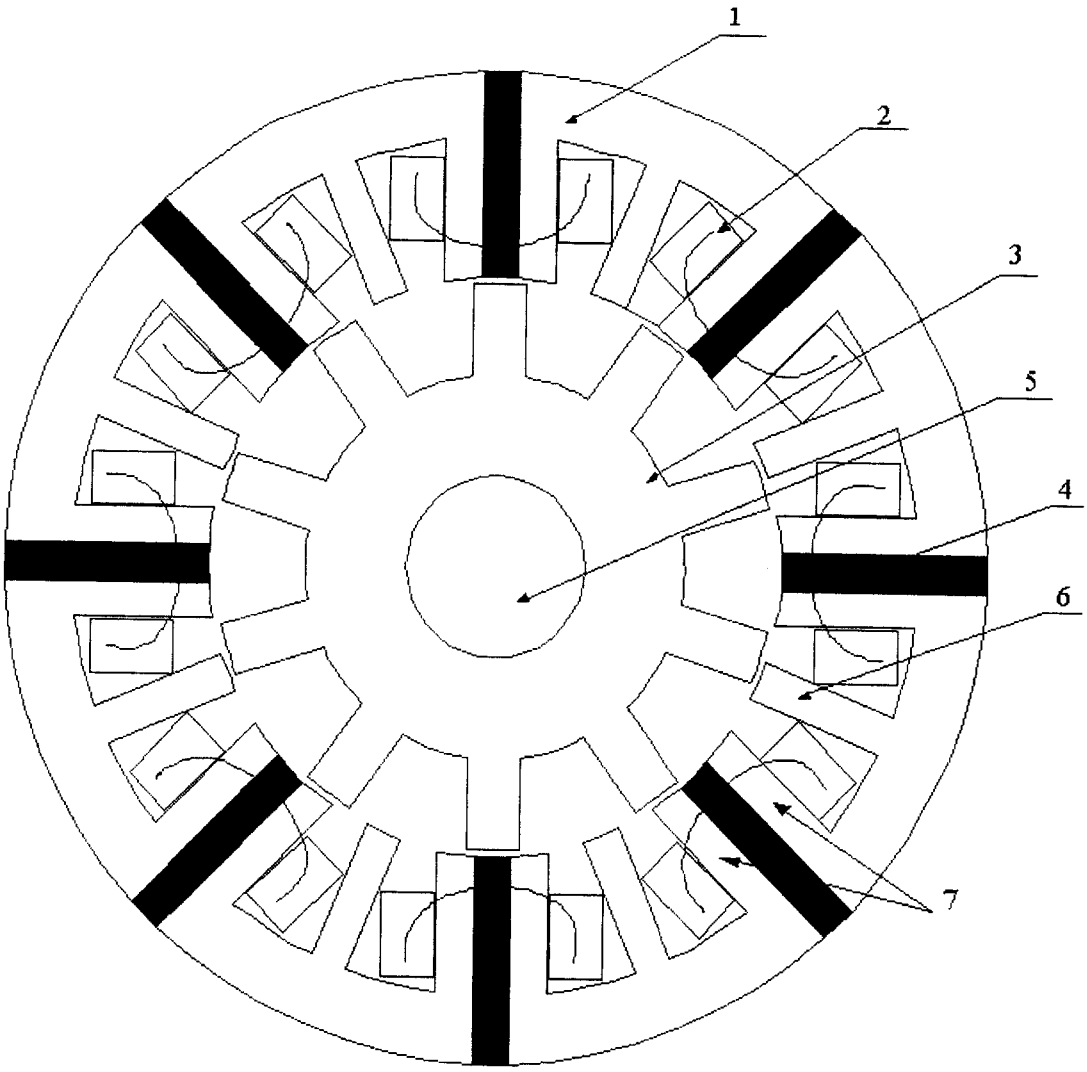


图 4

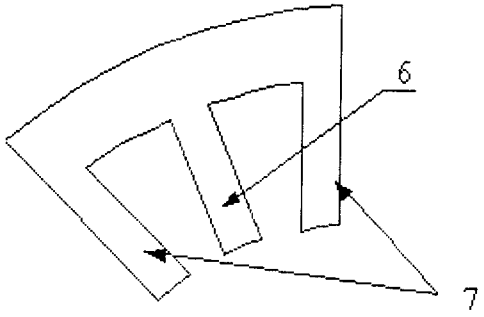


图 5

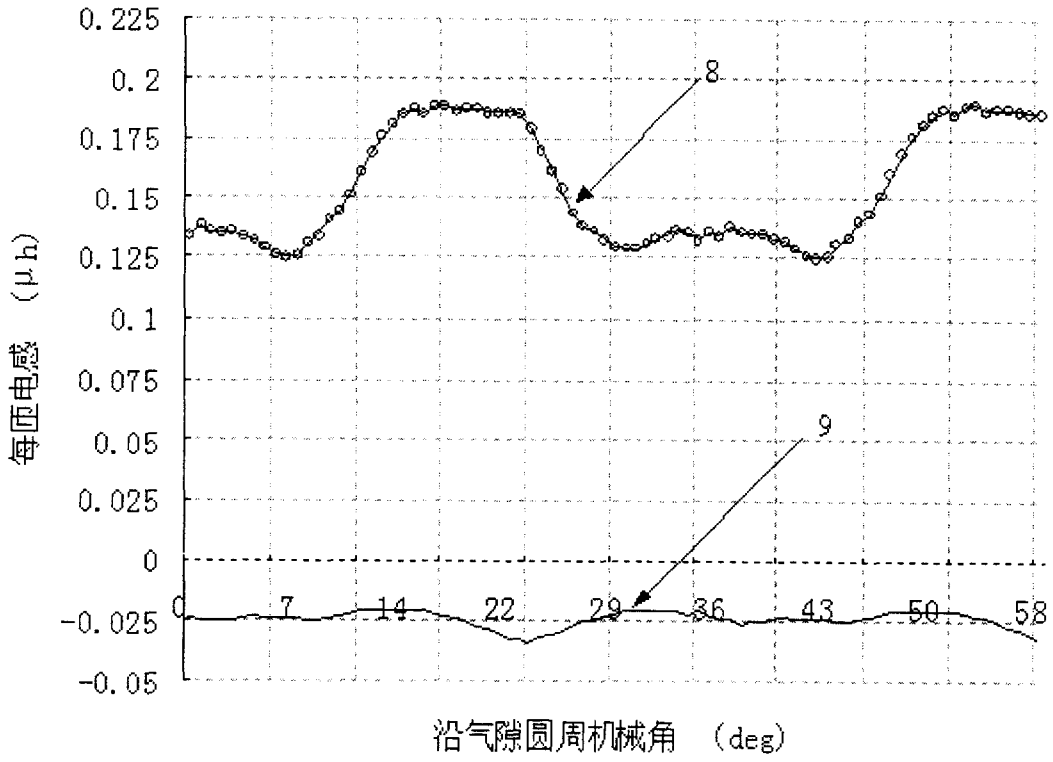

0.225
0.2
0.175
0.15
0.125
0.1
0.075
0.05
0.025
0
-0.025
-0.05
每匝电感 (μh)
8
9
0
7
14
22
29
36
43
50
58
沿气隙圆周机械角 (deg)

图 6

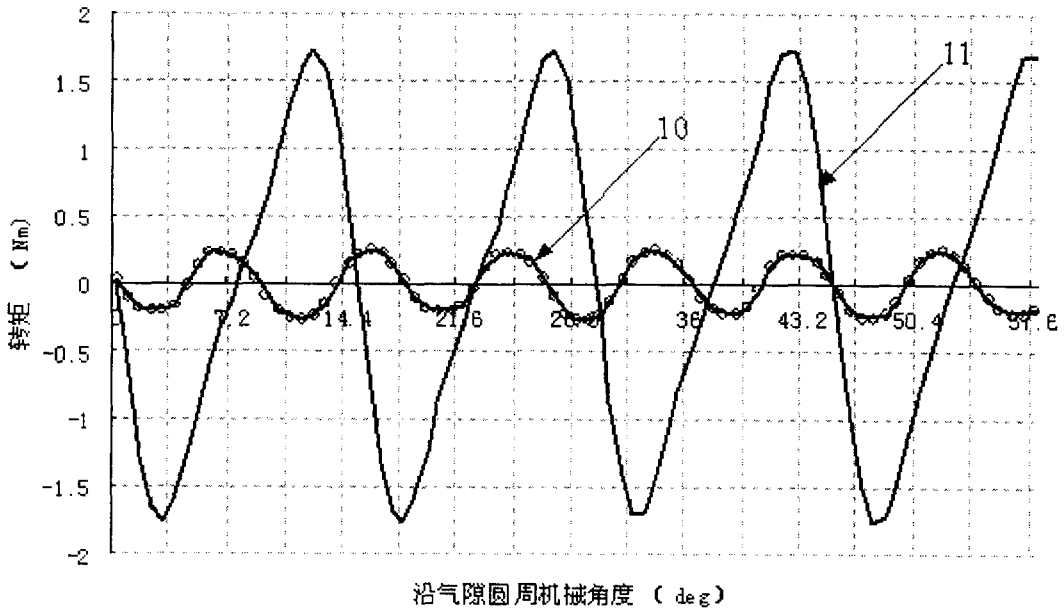

2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
转矩 (Nm)
11
10
7.2
14.4
21.6
36
43.2
50.4
θ
沿气隙圆周机械角度 (deg)

图 7

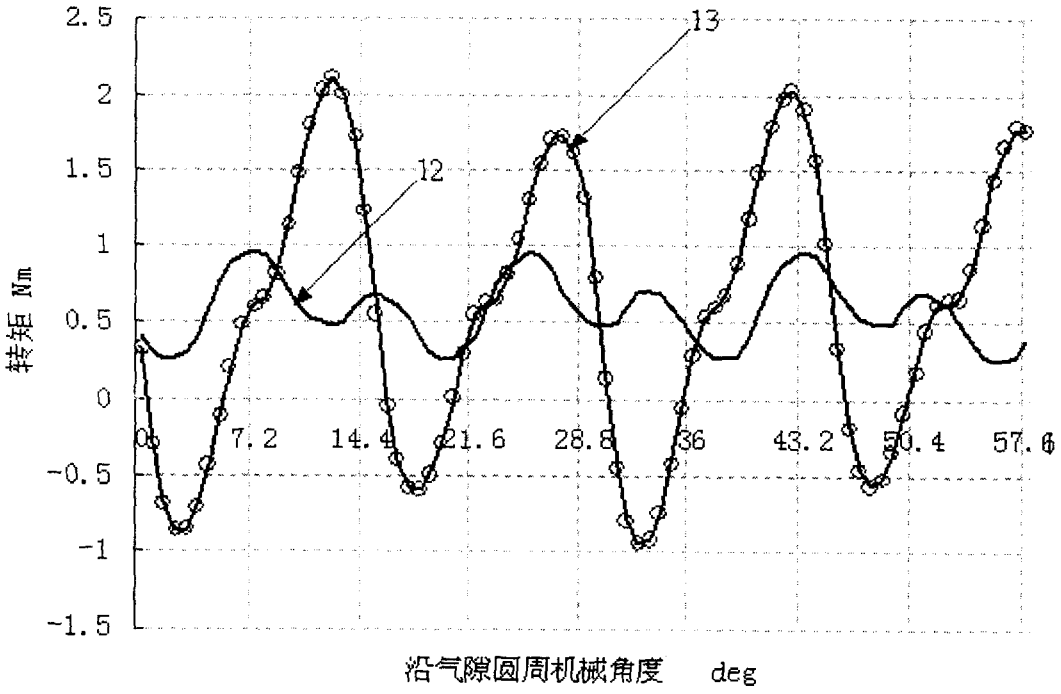

2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
转矩 Nm
0
7.2
14.4
21.6
28.8
36
43.2
50.4
57.6
13
12
沿气隙圆周机械角度 deg

图 8