



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109768683 B

(45)授权公告日 2020.08.28

(21)申请号 201811621472.3

(22)申请日 2018.12.28

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109768683 A

(43)申请公布日 2019.05.17

(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 全力 樊德阳 朱孝勇 项子旋  
蒋敏 浦尉玲

(51)Int.Cl.

H02K 16/04(2006.01)

H02K 1/27(2006.01)

审查员 薛冰

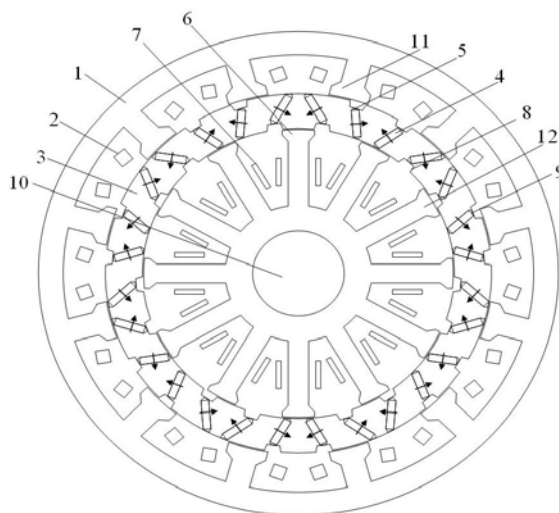
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

### (54)发明名称

一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制  
永磁电机

### (57)摘要

本发明公开一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机,在中间转子内部中沿圆周方向均匀地固定嵌有多组永磁体模块,每组永磁体模块均由两个永磁体按V型方式布置并且相互不接触,相邻两组永磁体模块中的型开口一个沿径向朝内,另一个沿径向朝外;每个永磁体内侧与外侧均设有空气磁障;中间转子的外圈上沿圆周方向开有多个外梯形槽、内圈上沿圆周方向开有多个内梯形槽,外梯形槽位于V型开口径向朝外的外侧,内梯形槽位于V型开口径向朝内的两个永磁体的内侧;基于磁场调制原理,通过V型永磁体拓扑结构、空气磁障和中间转子内外梯形槽的相互配合,改变电动拖拉机用电机磁场能量分布,增大气隙磁场有效谐波含量,提高输出转矩与功率因数。



1. 一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 在径向上由内到外依次是非导磁转轴(10)、内定子(6)、中间转子(3)、外定子(1)同轴心套装, 外定子(1)由外定子轭和外定子铁芯凸极(11)组成, 内定子(6)由内定子轭和内定子铁芯凸极(12)组成, 外定子铁芯凸极(11)上绕有外电枢绕组(2), 内定子铁芯凸极(12)上绕有内电枢绕组(7), 其特征是: 在中间转子(3)内部中沿圆周方向均匀地固定嵌有多组永磁体模块, 每组永磁体模块均由两个永磁体(4)按V型方式布置并且相互不接触, 相邻两组永磁体模块中的V型开口一个沿径向朝内, 另一个沿径向朝外; 每个永磁体(4)的内侧与外侧均设有空气磁障(5); 中间转子(3)的外圈上沿圆周方向开有多个外梯形槽(9)、内圈上沿圆周方向开有多个内梯形槽(8), 外梯形槽(9)位于V型开口径向朝外的两个永磁体(4)的外侧, 内梯形槽(8)位于V型开口径向朝内的两个永磁体(4)的内侧; 每个永磁体(4)的径向截面都是长方形, 长方形的两条短边在内外侧, 每组永磁体模块中的两个永磁体(4)的充磁方向都垂直于长方形的长边且指向V型开口内部; 外定子铁芯凸极(11)和内定子铁芯凸极(12)在径向上的相对位置相差180度电角度。

2. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 内梯形槽(8)与内侧的空气磁障(5)不相通, 之间留有中间转子(3)间隙; 外梯形槽(9)与外侧的空气磁障(5)不相通, 之间留有中间转子(3)间隙。

3. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 空气磁障(5)的径向截面是三角形。

4. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 外定子铁芯凸极(11)与内定子铁芯凸极(12)具有相同的凸极个数 $N_s$ , 与永磁体(4)的极对数 $N_r$ 满足关系式 $N_s=3N_c$ ,  $N_r=N_s \pm K1$ ,  $K1=1, 2, 3 \cdots$ ,  $N_c$ 为单相绕组所含有的线圈个数。

5. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 中间转子(3)的内圈半径是 $R_{ri}$ 、外圈半径是 $R_{ro}$ , 永磁体(4)的内端所在圆弧的半径为 $R_{pmi}$ 、外端所在圆弧的半径为 $R_{pmo}$ , 满足:  $4/5 \leq R_{ri}/R_{ro} \leq 5/6$ ,  $5/6 \leq R_{pmi}/R_{pmo} \leq 7/8$ 。

6. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 同一组永磁体模块中的两块永磁体(4)之间的夹角为 $2\beta_{pm}$ ,  $25^\circ \leq 2\beta_{pm} \leq 35^\circ$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机, 其特征是: 外梯形槽(9)的梯形两腰夹角 $\alpha_2$ ,  $25^\circ \leq \alpha_2 \leq 30^\circ$ ; 内梯形槽(8)的梯形两腰夹角 $\alpha_3$ ,  $12^\circ \leq \alpha_3 \leq 18^\circ$ ; 位于一组永磁体模块中的两个永磁体(4)内侧的两个内梯形槽(8)组成一组, 同一组的两个内梯形槽(8)的中心线间的夹角为 $\beta_{sli}$ , 位于一组永磁体模块中的两个永磁体(4)外侧的两个外梯形槽(9)组成一组, 同一组的两个外梯形槽(9)的中心线间夹角为 $\beta_{slo}$ , 满足:  $\beta_{sli}=\beta_{slo}$ 。

## 一种适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机

### 技术领域

[0001] 本发明属于永磁电机制造技术领域,特指一种基于磁场调制原理的双定子永磁电机,适用于电动拖拉机。

### 背景技术

[0002] 农用电动拖拉机因具有零排放、低噪音的特点受到关注,在电动拖拉机的动力系统中,电机常常作为能量转换的核心部件,其性能直接关系到系统能源转换效率和可靠性。为满足电动拖拉机复杂耕种场合作业的需求,电动拖拉机动力系统的电机需要能够在低速运行条件下输出相对较大转矩。目前,在需要低速大转矩的传统工业场合中,大多采用普通转速的电机加上机械齿轮箱等变速装置,通过利用机械的变速装置,降低电机的转速以提高转矩,从而满足低速大转矩的要求。通过使用额外的机械变速装置,虽然在一定程度上可以满足动力系统低速大转矩的要求,但是机械变速装置的使用会额外加重电机的噪音、振动、安全性和维护问题,此外,机械变速装置也增加了系统的能量转换环节,从而不可避免的降低了系统效率。

[0003] 基于磁场调制原理运行的磁齿轮拓扑结构能提升永磁电机的转矩密度,在该类电机中,电机磁源所产生的低速谐波通过调磁侧的凸极作用在气隙中调制产生高速谐波。中国专利申请号为201711308185.2的文献中提出了一种将新型磁齿轮符合于传统永磁电机上的拓扑结构,通过不同极化方向永磁体的组合,构建磁齿轮电机在定子上的磁路,使得磁路更加高效合理,在实现低速大转矩输出的同时减小了电机漏磁,从而提高了复合电机的整体转矩密度和效率,但是,这种磁齿轮复合电机具有三层气隙结构与两个旋转部件,机械结构较为复杂,加大了电机加工制造难度。中国专利申请号为201210539414.2的文献中提出一种聚磁式定子永磁型游标电机,在该游标电机中,通过在定子结构中引入调制齿,在定子电枢极数和槽数较少的情况下,利用磁场调制效应产生的多种磁场谐波分量,从而显著增加电机的转矩密度,但是在该类电机中,由于电机漏磁较多造成永磁体利用率较低,从而导致传统游标电机功率因数往往较低。

[0004] 因此,如何基于磁场调制原理,在维持电机能够在相对较低转速下输出较高转矩和功率密度的同时提高电机功率因数以及永磁利用率,成为电动拖拉机用电机领域的亟需解决的问题。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是解决现有技术所存在的问题,提出一种高功率因数、高永磁利用率、高转矩密度、高功率密度的适用于电动拖拉机的双定子磁场调制永磁电机,以满足电动拖拉机用电机能够在相对较低转速下输出较高转矩和功率密度的同时提高电机功率因数以及永磁利用率的性能需求。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案是:在径向上由内到外依次是非导磁转轴、内定子、中间转子、外定子同轴心套装,外定子由外定子轭和外定子铁芯凸极组成,内定

子由内定子轭和内定子铁芯凸极组成,外定子铁芯凸极上绕有外电枢绕组,内定子铁芯凸极上绕有内电枢绕组,在中间转子内部中沿圆周方向均匀地固定嵌有多组永磁体模块,每组永磁体模块均由两个永磁体按V型方式布置并且相互不接触,相邻两组永磁体模块中的型开口一个沿径向朝内,另一个沿径向朝外;每个永磁体的内侧与外侧均设有空气磁障;中间转子的外圈上沿圆周方向开有多个外梯形槽、内圈上沿圆周方向开有多个内梯形槽,外梯形槽位于V型开口径向朝外的两个永磁体的外侧,内梯形槽位于V型开口径向朝内的两个永磁体的内侧;每个永磁体的径向截面都是长方形,长方形的两条短边在内外侧,每组永磁体模块中的两个永磁体的充磁方向都垂直于长方形的长边且指向V型开口内部。

[0007] 内梯形槽与内侧的空气磁障不相通,之间留有中间转子间隙;外梯形槽与外侧的空气磁障不相通,之间留有中间转子间隙。

[0008] 本发明采用上述技术方案后具有的有益效果是:

[0009] 1、本发明基于磁场调制原理,通过V型永磁体拓扑结构、空气磁障,中间转子内外梯形槽等针对性设计,相互配合,有效改变该电动拖拉机用电机磁场能量分布,并增大气隙磁场有效谐波含量,降低气隙磁场无效谐波含量,从而较大程度提高电机输出转矩与功率因数。

[0010] 2、本发明在中间转子内外边缘采用梯形开槽,基于磁场调制原理,通过对中间转子边缘的针对性的梯形开槽,可以有效降低该电动拖拉机用电机气隙中无用谐波含量,从而可以提高电机空载反电势的正弦度与转矩输出能力。

[0011] 3、本发明采用双定子电机结构,内外定子上都有一套绕组,只有中间转子一个旋转部件,从而增加该电动拖拉机用电机绕组空间以及相应电负载能力,因此,该电机可以有效改善电机的电磁能量分布以及较大增加电机的转矩输出能力,满足电机在较低转速输出较大转矩的能力。

[0012] 4、本发明采用内外双定子电机结构,使得该电动拖拉机用电机通过内外两层气隙,有效改善电机永磁磁路,极大的降低了该电动拖拉机用电机的外部漏磁与极间漏磁,从而增加了电机的永磁利用率。并且,内外两层的气隙结构,使得该电机能够将传统游标电机中的极间与外部的漏磁磁能转化为电机可以利用的永磁磁能,因此,电机无功损耗得到降低,从而可以有效提高电机的功率因数。

[0013] 5、本发明在中间转子中采用V型永磁体拓扑结构,该V型永磁体拓扑结构通过改变永磁磁链的走向,产生永磁聚磁效果,从而在相同永磁体用量的情况下,提高了该电动拖拉机用电机的内外气隙磁密,增大了电机的转矩输出能力与功率密度。

[0014] 6、本发明采用内外定子径向相对位置相差180度电角度结构,改变了气隙中蕴含的磁能积相对内外定子相对位置角变化率的方向,使得该电动拖拉机用电机内外气隙产生的定位力矩通过叠加后相互抵消,已达到减小作用在转子上总定位力矩的目的,从而获得有效减小电机转矩脉动。

[0015] 7、本发明所采用的内外两套电枢绕组分别放电机的内外定子上,从而避免了碳刷与滑环的使用,从而使该电动拖拉机用电机获得无刷化的效果。

## 附图说明

[0016] 下面根据附图和具体实施方式对本发明做进一步详细说明。

- [0017] 图1是本发明的径向截面放大示意图；
- [0018] 图2是本发明的内外电枢绕组的安装与连接方式示意图；
- [0019] 图3是图1中的中间转子的结构以及几何尺寸标注放大示意图；
- [0020] 图4是本发明运行在第一位置是沿圆周方向展开的局部视图以及磁通示意图；
- [0021] 图5是从图4的第一位置运行到第二位置的磁通示意图；
- [0022] 图6是本发明中外电枢绕组的空载反电势波形图；
- [0023] 图7是本发明中内电枢绕组的空载反电势波形图；
- [0024] 图中：1. 外定子；2. 外电枢绕组；3. 中间转子；4. 永磁体；5. 空气磁障；6. 内定子；7. 内电枢绕组；8. 内梯形槽；9. 外梯形槽；10. 非导磁转轴；11. 外定子铁芯凸极；12. 内定子铁芯凸极。

### 具体实施方式

[0025] 参见图1，本发明有外定子1、中间转子3、内定子6、外电枢绕组2、内电枢绕组7以及非导磁转轴10组成。外定子1同轴心空套在中间转子3外，中间转子3同轴心空套内定子6外，内定子6同轴心空套在非导磁转轴10外。这样，本发明在径向上由内到外依次是非导磁转轴10、内定子6、中间转子3、外定子1同轴心套装。外定子1由外定子轭和外定子铁芯凸极11组成，内定子6由内定子轭和内定子铁芯凸极12组成。外定子铁芯凸极11上绕有外电枢绕组2，内定子铁芯凸极12上绕有内电枢绕组7。

[0026] 在径向上，内定子6的外圈表面与中间转子3的内圈表面留有0.5mm的内气隙，而外定子1的内圈表面与中间转子3的外圈表面留有0.5mm的外气隙。外定子1、中间转子3和内定子6都是有0.35mm厚度的D23硅钢片叠压而成，叠压系数为0.95，非导磁转轴10是由散热系数较高的非导磁材料组成。

[0027] 在中间转子3内部中沿圆周方向均匀地固定嵌有多组永磁体模块，每组永磁体模块均由两个永磁体4组成，每组永磁体模块中的两个永磁体4按V型方式布置并且两个永磁体4相互不接触。相邻两组永磁体模块中的两个永磁体4按V型布置时的V型开口朝向相反，一个V型开口沿径向朝内，一个V型开口沿径向朝外。每个永磁体4的径向截面都是长方形，长方形的两条短边是在内侧和外侧的两条边，长方形的两条长边是在切向两侧的两条边。每组永磁体模块中的两个永磁体4的充磁方向都垂直于长方形的长边且指向V型开口内部。

[0028] 每个永磁体4的内侧与外侧均设的是空气磁障5，空气磁障5的径向截面是三角形。

[0029] 在中间转子3的外圈上沿圆周方向开有多个外梯形槽9，在中间转子3的内圈上沿圆周方向开有多个内梯形槽8。对于相邻的两组永磁体模块，外梯形槽9位于其中的V型开口径向朝外的一组永磁体模块中的两个永磁体4的外侧，内梯形槽8位于其中V型开口径向朝内的一组永磁体模块中的两个永磁体4的内侧。也就是两个外梯形槽9组成一组，两个内梯形槽8也组成一组，一组外梯形槽9和一组内梯形槽8在圆周方向交错布置。相邻的两组内梯形槽8之间间隔了V型开口径向朝外的一组永磁体模块，相邻的两组外梯形槽9之间间隔了V型开口径向朝内的一组永磁体模块。因此，永磁体4的极对数为 $N_r$ ，中间转子3上有 $N_r$ 个内梯形槽8与同样数量的 $N_r$ 个外梯形槽9。

[0030] 内梯形槽8与内侧的空气磁障5不相通，之间有0.3mm径向厚度的中间转子3间隙，外梯形槽9与外侧的空气磁障5不相通，之间是有0.3mm径向厚度的中间转子3间隙。

[0031] 外定子铁芯凸极11和内定子铁芯凸极12在径向上的相对位置相差180度电角度。外定子铁芯凸极11与内定子铁芯凸极12具有相同的凸极个数 $N_s$ 。外定子1与内定子6的凸极数 $N_s$ 与永磁体4的极对数 $N_r$ 满足关系式： $N_s=3N_c$ ， $N_r=N_s \pm K_1$ ，其中， $K_1=1, 2, 3 \cdots$ ， $N_c$ 为单相绕组所含有的线圈个数， $N_s$ 可以取6, 12, 18,  $K_1$ 则可以相应的取1, 2, 3等整数。因此本发明可有多种极槽配比。

[0032] 参见图2，其中“+”为外电枢绕组2与内电枢绕组7的进线方向，“-”为外电枢绕组2与内电枢绕组7的出线方向，A, B, C为电机三相绕组。其中，每相绕组一共分为 $N_c$ 组线圈，且外电枢绕组2集中式匝绕于外定子铁芯凸极11上，内电枢绕组7集中式匝绕于内定子铁芯凸极12上。

[0033] 参见图3，所有的永磁体模块在径向截面上均具有同一圆心 $O$ ，且圆心 $O$ 与非导磁转轴10、内定子6以及外定子1的轴心重合。

[0034] 中间转子3的内圈半径是 $R_{ri}$ ，中间转子3的外圈半径是 $R_{ro}$ ，永磁体4的内端所在圆弧的半径为 $R_{pmi}$ ，永磁体4的外端所在圆弧的半径为 $R_{pmo}$ ，为有效提高电机谐波利用率，满足约束关系： $4/5 \leq R_{ri}/R_{ro} \leq 5/6$ 以及 $5/6 \leq R_{pmi}/R_{pmo} \leq 7/8$ 。

[0035] 同一组永磁体模块中的两块永磁体4之间的夹角为 $2\beta_{pm}$ ， $\beta_{pm}$ 满足约束关系： $25^\circ \leq 2\beta_{pm} \leq 35^\circ$ 。

[0036] 外梯形槽9的梯形的两腰的夹角 $\alpha_2$ ， $25^\circ \leq \alpha_2 \leq 30^\circ$ 。内梯形槽8的梯形两腰的夹角 $\alpha_3$ ， $12^\circ \leq \alpha_3 \leq 18^\circ$ 。

[0037] 同一组的两个内梯形槽8的中心线间的夹角为 $\beta_{sli}$ ，同一组的两个外梯形槽9的中心线间夹角为 $\beta_{slo}$ ，满足约束关系： $\beta_{sli}=\beta_{slo}$ 。

[0038] 参见图4和图5，本发明工作时，在电机运行过程中，内定子6与外定子1中流过的磁通(磁链)会根据中间转子3的不同位置切换方向。如图4所示为电机运行在第一个位置时，中间转子3与内定子6以及外定子1的相对位置为：设中间转子3的相对运动方向为顺时针旋转，因此，按从左到右的顺序是：外定子1的第二个外定子铁芯凸极11与中间转子3的第一个外梯形槽9相对应。相邻的两组永磁模块中的磁路相互并联。此时，图4中从左到右方向上，第一组永磁模块中的第一个永磁体4产生的磁通 $a_1$ 与第二个永磁体4产生的磁通 $b_1$ 均以顺时针方向穿过内电枢绕组7与外电枢绕组2。第一个永磁体4产生的磁通 $a_1$ 的路径如下：依次经过第一个永磁体4、中间转子3、内气隙、第一个内定子铁芯凸极12、内定子轭、第二个内定子铁芯凸极12、内气隙、第三个永磁体4、中间转子3、外气隙、第二个外定子铁芯凸极11、外定子轭、第一个内定子铁芯凸极12、外气隙、第一个永磁体4。第二个永磁体4产生的磁通 $b_1$ 的路径如下：第二个永磁体4、中间转子3、内气隙、第一个内定子铁芯凸极12、内定子轭、第二个内定子铁芯凸极12、内气隙、第四个永磁体4、中间转子3、外气隙、第二个外定子铁芯凸极11、外定子轭、第一个外定子铁芯凸极11、外气隙、第二个永磁体4。由此可见，磁通 $a_1$ 和磁通 $b_1$ 以同方向经过内定子6与外定子1，形成一条完整的并联磁路。因此，在图4位置时，本发明具有较强的聚磁效应，可以提高较高的气隙磁密。

[0039] 当中间转子3运行到图5所示的第二个位置时，其中间转子3与内定子6以及外定子1的相对位置为：从左往右的顺序是，中间转子3的第一个内梯形槽8与第一个内定子铁芯凸极12相对。第一个永磁体4与第二个永磁体4的磁路相互并联。此时，图5中从左往右方向上第一个永磁体4产生的磁通 $a_2$ 与第二个永磁体4产生的磁通 $b_2$ 均以逆时针方向穿过电枢绕

组。第一个永磁体4产生的磁通a2的路径依次为：第一个永磁体4、中间转子3、内气隙、第一个内定子铁芯凸极12、内定子轭、第二个内定子铁芯凸极12、内气隙、第三个永磁体4、中间转子3、外气隙、第二个外定子铁芯凸极11、外定子轭、第一个外定子铁芯凸极11、外气隙、第一个永磁体4。第二个永磁体4产生的磁通b2的路径依次为第二个永磁体4、中间转子3、内气隙、第一个内定子铁芯凸极12、内定子轭、第二个内定子铁芯凸极12、内气隙、第三个永磁体4、中间转子3、外气隙、第二个外定子铁芯凸极11、外定子轭、第一个外定子铁芯凸极11、外气隙、第二个永磁体4。因此，在图5位置时，本发明具有较强的聚磁效应，可以提高较高的气隙磁密。此外，由于在图4中所示的第一位置时，磁通a1与b1均以顺时针方向通过外电枢绕组2与内电枢绕组7，而在图4所示的第二位置时，磁通a2与b2均以逆时针方向通过外电枢绕组2与内电枢绕组7，因此当连续切换中间转子3与内定子6和外定子1的位置时，外电枢绕组2与内电枢绕组7中会感应出具有双极性的交变感应电动势。

[0040] 参见图6、图7，图6为本发明内电枢绕组7的空载反电势波形图，图7为本发明外电枢绕组2的空载反电势图，可以看出，本发明基于磁场调制原理，通过将永磁体4、空气磁障5以及中间转子3的内外梯形槽的相互配合，使得空载反电势的波形显示出较高的正弦度，且适合于无刷交流控制运行。

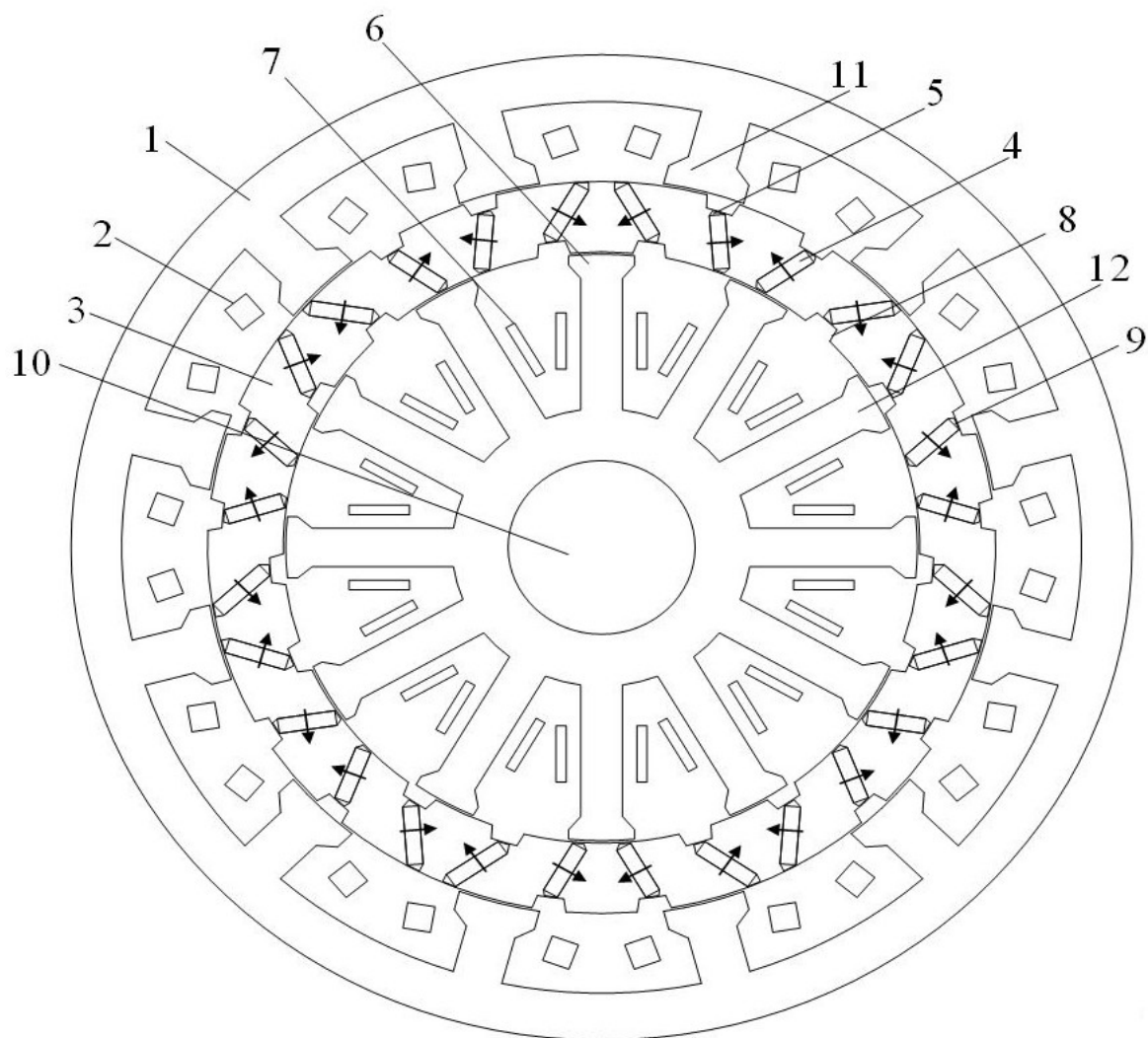


图1

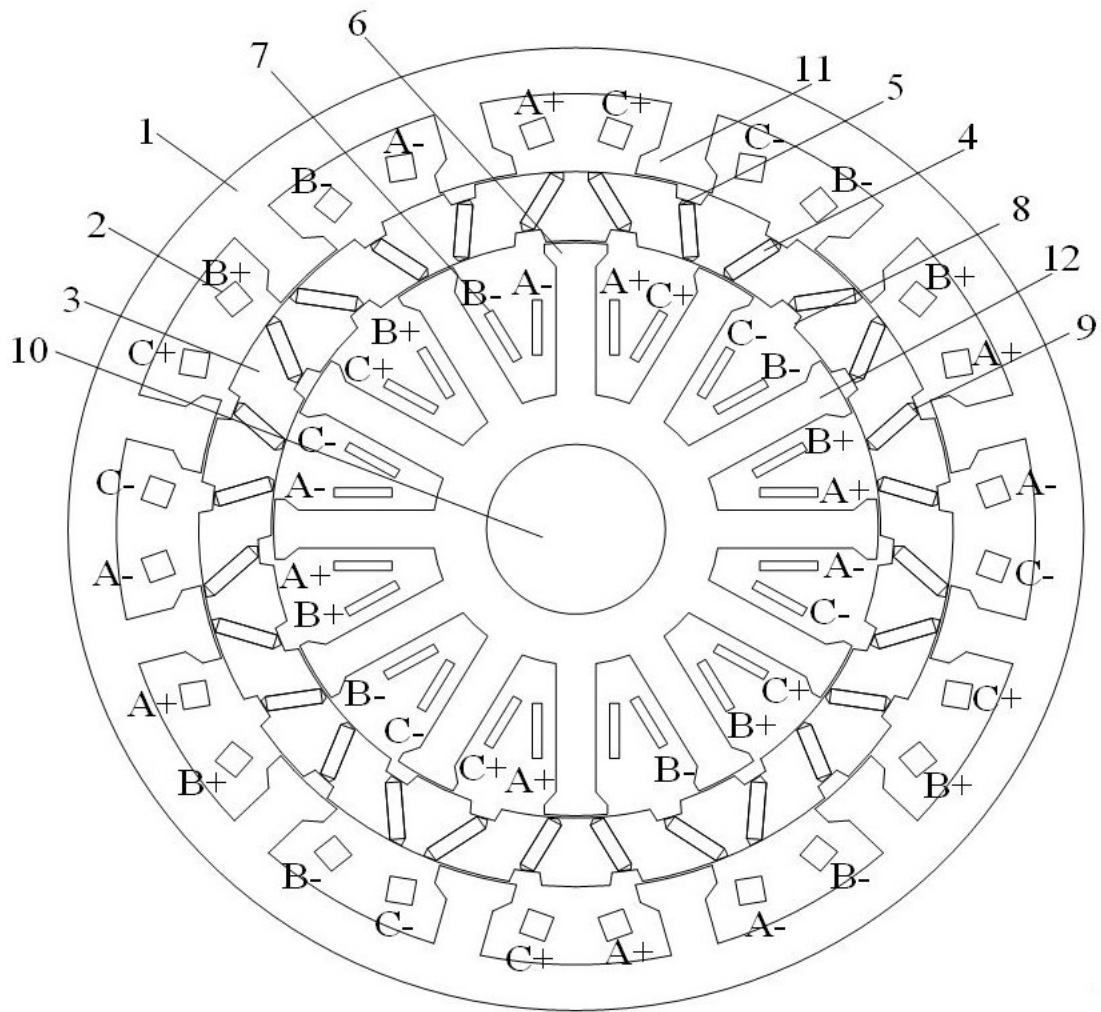


图2

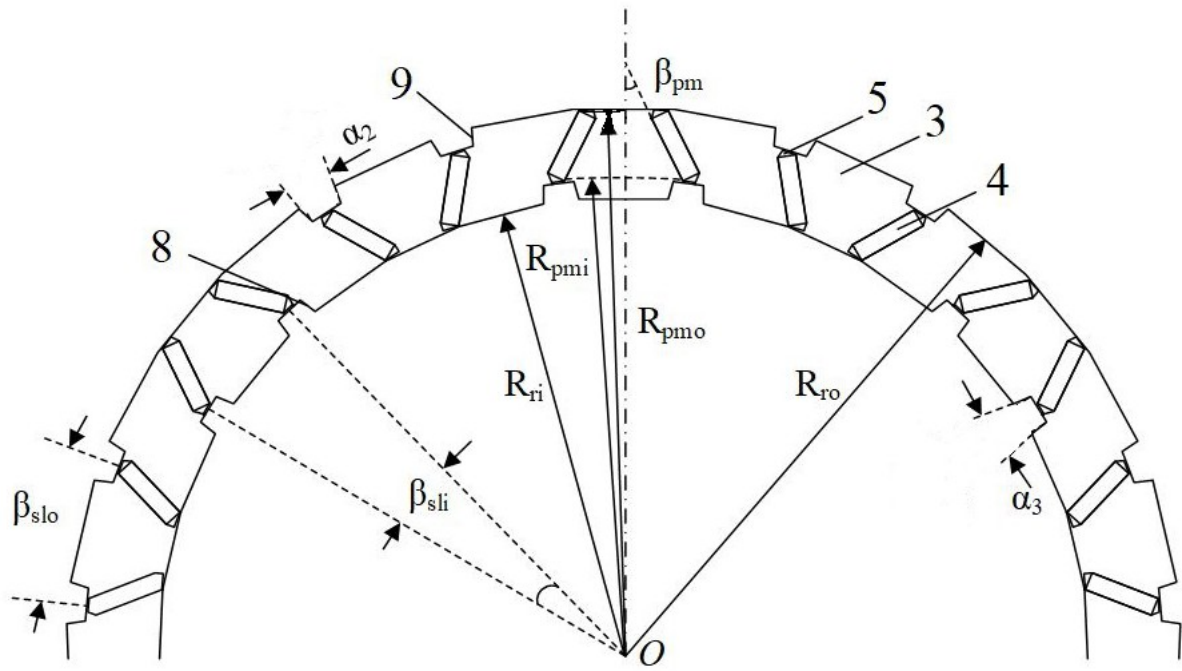


图3

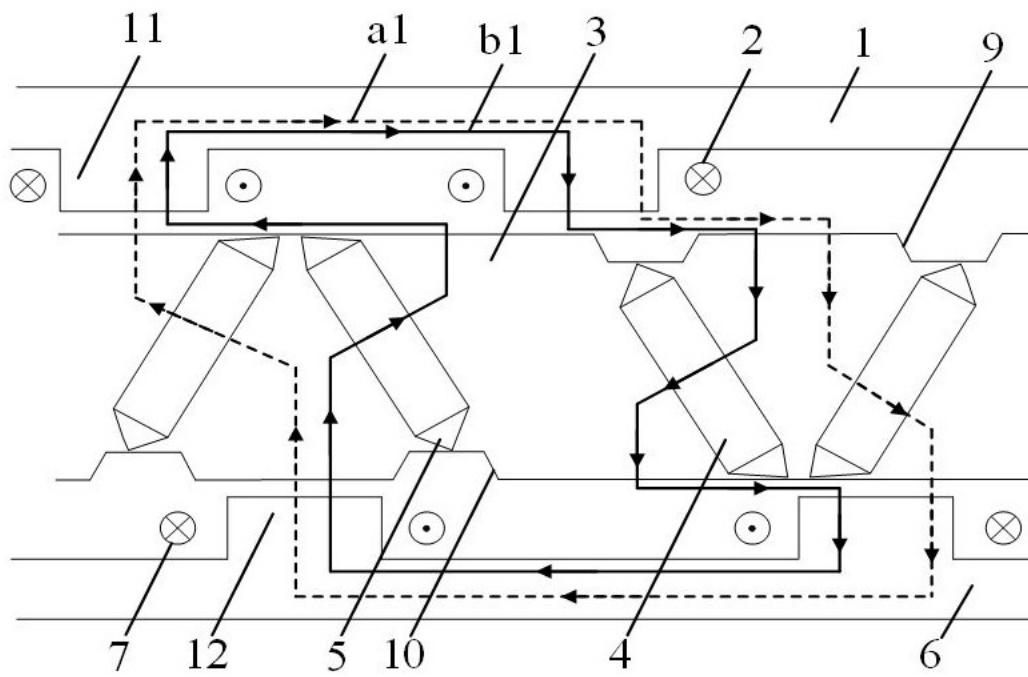


图4

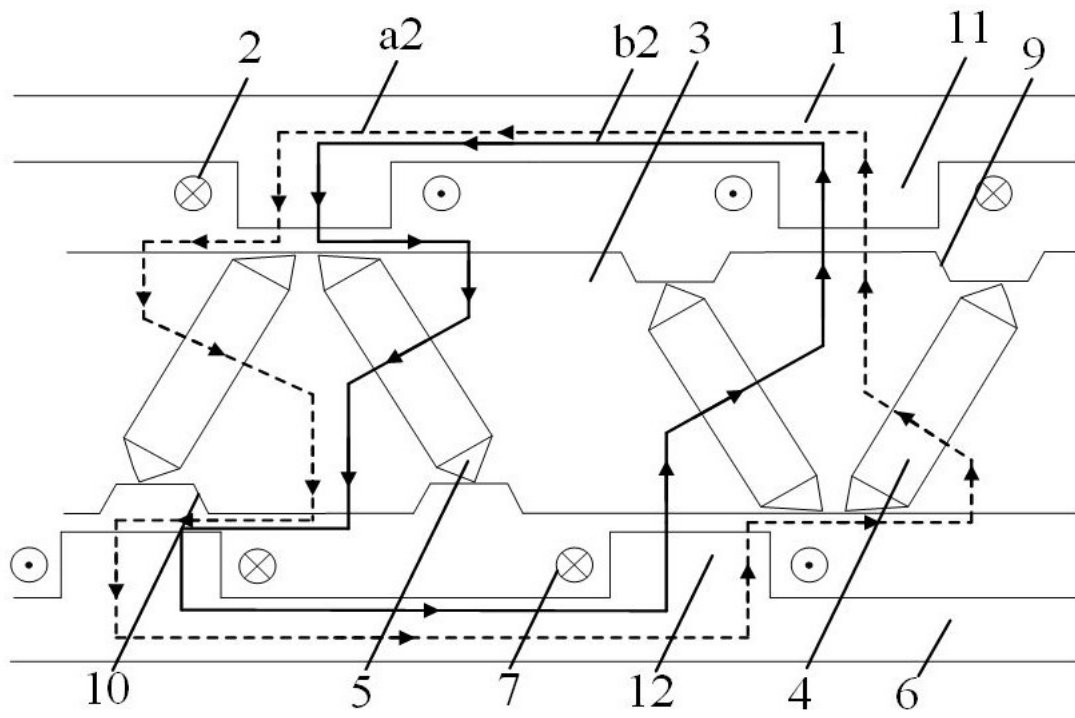


图5

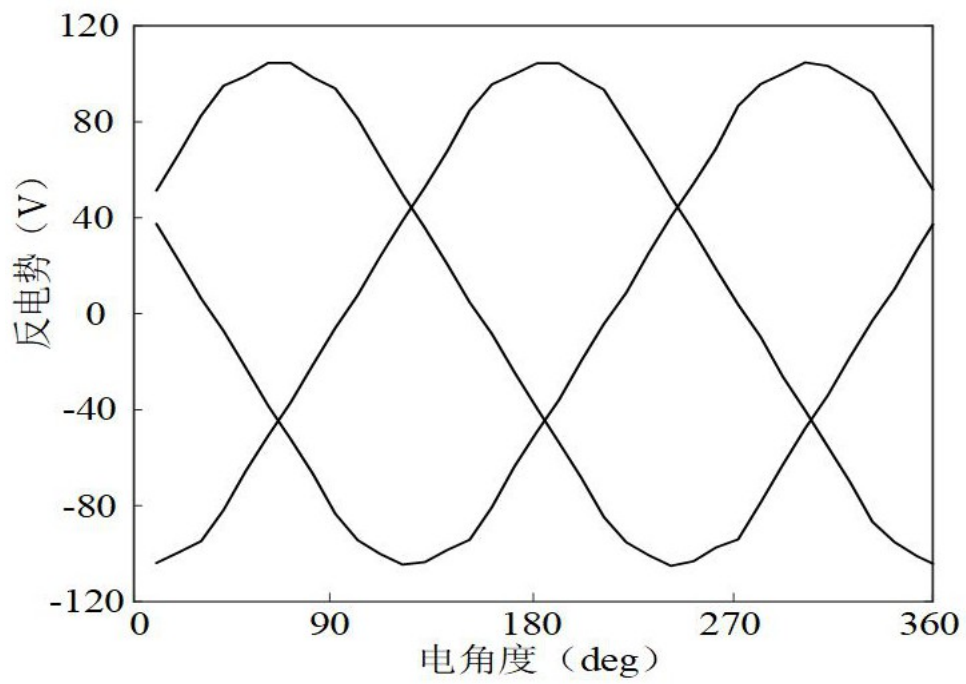


图6

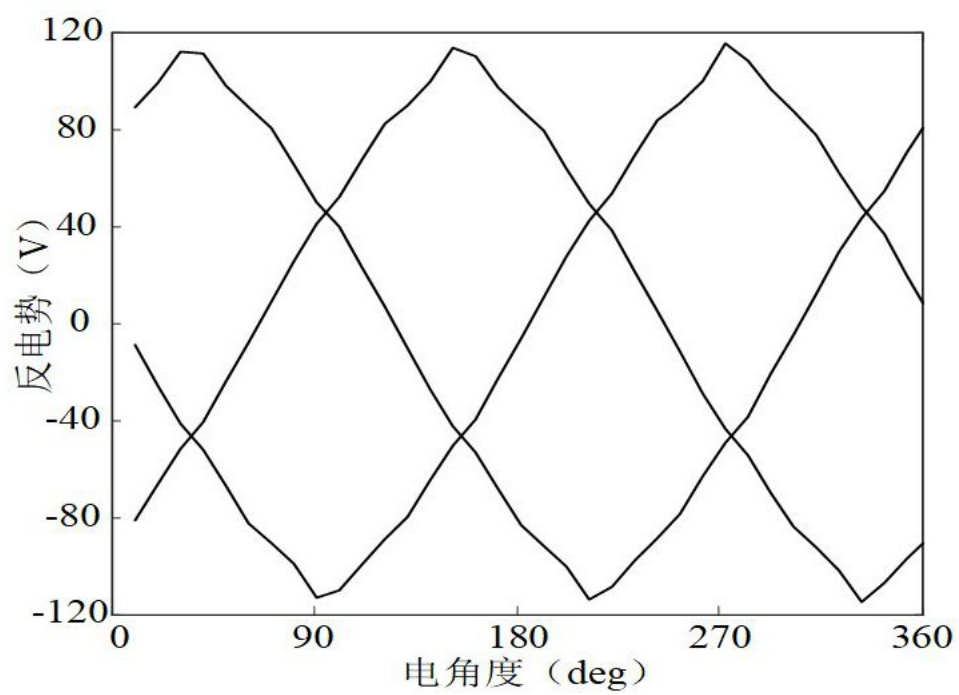


图7