



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110855119 A

(43)申请公布日 2020. 02. 28

(21)申请号 201911099005.3

(22)申请日 2019.11.11

(71)申请人 华中科技大学

地址 430074 湖北省武汉市洪山区珞喻路
1037号

(72)发明人 李大伟 李睿 曲荣海 石超杰
周游

(74)专利代理机构 华中科技大学专利中心
42201

代理人 李智

(51) Int. Cl.

H02K 41/03(2006.01)

H02K 1/16(2006.01)

H02K 3/12(2006.01)

H02K 1/27(2006.01)

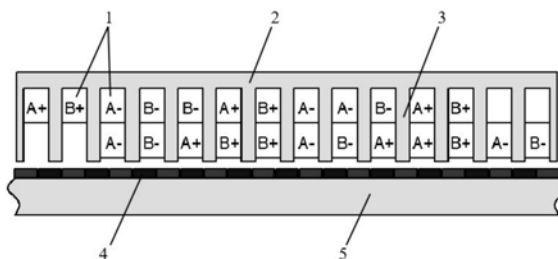
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种分数极两相游标永磁直线电机

(57)摘要

本发明公开了一种分数极两相游标永磁直线电机,包括:电枢绕组、初级铁心轭部、初级铁心齿部、永磁磁极和次级铁心;永磁磁极阵列均匀分布在次级铁心上,且相邻永磁磁极极性相反;电枢绕组、初级铁心轭部和初级铁心齿部组成电机初级;永磁磁极和次级铁心组成电机次级;直线电机初级与次级之间存在气隙,两者可以相互移动。本发明取消了传统游标永磁直线电机中有效永磁磁极数为偶数的约束,提出了分数极概念,使永磁直线电机有效磁极数可以为分数,扩充了可能的极槽配合方案,提高了直线电机设计自由度。本发明在保持游标永磁直线电机的高推力密度特性的同时,降低了水平推力波动和纵向磁拉力波动,有助于提高电机的控制精度和响应速度。



1. 一种分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,包括:电枢绕组(1),初级铁心轭部(2),初级铁心齿部(3),永磁磁极(4)和次级铁心(5);

所述电枢绕组(1)环绕于所述初级铁心齿部(3);所述初级铁心轭部(2)和初级铁心齿部(3)构成电机初级铁心;多个相同大小的永磁磁极(4)沿电机初级运动方向均匀分布在所述次级铁心(5)上,形成永磁体阵列,且相邻永磁磁极极性相反。

2. 如权利要求1所述的分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,直线电机初级对应的有效永磁磁极数 $2P_f$ 不为整数;电机初级与电机次级之间存在气隙且可以相互移动。

3. 如权利要求2所述的分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,电机有效永磁磁极数 $2P_f$ 、初级铁心槽数 Z_s 与电枢绕组极对数 P_a 满足磁场调制原理: $P_a = |P_f \pm Z_s|$ 。

4. 如权利要求1-3任一项所述的分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,所述游标永磁直线电机的电枢绕组极对数 P_a 、初级铁心槽数 Z_s 、与绕组相数 m 满足关系:

$$\frac{Z_s \cdot Q}{\text{GCD}(Z_s \cdot Q, P_a \cdot Q)} = mk;$$

其中 k 为任意整数, Q 为使 $P_a \cdot Q$ 为整数的最小整数, GCD 为取最大公约数运算。

5. 如权利要求1-4任一项所述的分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,根据槽号星形图确定电机的极槽配合。

6. 如权利要求5所述的分数极两相游标永磁直线电机,其特征在于,电磁力波动的基波

$$\text{相对于基波电频率的阶数 } N_c = \frac{\text{LCM}(Z_s \cdot Q, 2P_a \cdot Q)}{P_a \cdot Q} = \frac{\text{LCM}(Z_s \cdot Q, 2P_f \cdot Q)}{P_f \cdot Q},$$

其中, LCM 为取最小公倍数运算, $2P_f$ 为永磁磁极个数, Z_s 为电机初级铁心槽数, P_a 为电枢绕组极对数, Q 为使 $P_a \cdot Q$ 为整数的最小正整数。

一种分数极两相游标永磁直线电机

技术领域

[0001] 本发明属于永磁电机技术领域,更具体地,涉及一种分数极两相游标永磁直线电机。

背景技术

[0002] 相较于旋转电机加滚珠丝杠形成直线运动的方案,采用直线电机直接产生直线运动的方案拥有更简单的结构、更高的效率和更好的稳定性。因而直线电机越来越受到需要直线运动的工业领域的青睐。直线电机分为直线感应电机和直线永磁电机两类。与直线感应电机相比,直线永磁电机具有更好的推力密度,功率因数和效率性能。而在众多直线电机拓扑中,采用了永磁体和游标电机原理的游标永磁直线电机兼具永磁电机结构简单、效率高的特点和游标电机低速大转矩的特点,因此近年来倍受关注。

[0003] 如图1所示,直线电机的极槽配合通常由一个等效的旋转电机设计。在旋转电机中,由于0电角度和360电角度的机械位置是重合的,电机的永磁磁极数必须是偶数,这样电机的电角度才会在机械圆周上周期性地变化。因为直线电机来自于等效的旋转电机,所以在直线电机的设计中往往遵循同样的约束(即电机永磁磁极数为偶数),这实际上是一个冗余的约束。同时,传统游标永磁直线电机的整数极的极槽配合设计也存在电机端部很长的问题。在直线电机中,由于0电角度和360电角度的机械位置不重合,动子有效长度内永磁磁极可以选择为分数。在不受偶极数约束的情况下,直线永磁电机将有更多新的极槽配合可供选择。

[0004] 直线永磁游标电机在运行时,永磁磁极与直线电机初级之间会产生纵向磁拉力;同时,受传统永磁直线电机固有的边端效应的影响,会使其运行过程中的电磁推力和纵向磁拉力存在较大的波动。波动的纵向磁拉力不仅会增大电机导轨和系统支撑部件的变形风险,还给系统引入一个变化的阻力,增加电机的控制难度,降低系统的控制精度和响应速度。

发明内容

[0005] 针对现有技术的缺陷,本发明的目的在于提出一种分数极两相游标永磁直线电机,旨在取消游标永磁直线电机有效范围内磁极个数为偶数这一约束,增加游标永磁直线电机设计自由度。

[0006] 本发明提供了一种分数极两相游标永磁直线电机,包括:电枢绕组,初级铁心轭部,初级铁心齿部,永磁磁极和次级铁心;电枢绕组环绕于所述初级铁心齿部;初级铁心轭部和初级铁心齿部构成电机初级铁心;多个相同大小的永磁磁极沿电机初级运动方向均匀分布在所述次级铁心上,形成永磁体阵列,且相邻永磁磁极极性相反。

[0007] 更进一步地,直线电机初级对应的有效永磁磁极数 $2P_f$ 不为整数;电机初级与电机次级之间存在气隙且可以相互移动。

[0008] 更进一步地,电机有效永磁磁极数 $2P_f$ 、初级铁心槽数 Z_s 与电枢绕组极对数 P_a 满足

磁场调制原理： $P_a = |P_f \pm Z_s|$ 。

[0009] 更进一步地，游标永磁直线电机的电枢绕组极对数 P_a 、初级铁心槽数 Z_s 、与绕组相

数 m 满足关系：
$$\frac{Z_s \cdot Q}{\text{GCD}(Z_s \cdot Q, P_a \cdot Q)} = mk$$
 其中 k 为任意整数， Q 为使 $P_a \cdot Q$ 为整数的最小整

数， GCD 为取最大公约数运算。

[0010] 更进一步地，根据槽号星形图确定电机的极槽配合。

[0011] 更进一步地，电磁力波动的基波相对于基波电频率的阶数

$$N_c = \frac{\text{LCM}(Z_s \cdot Q, 2P_a \cdot Q)}{P_a \cdot Q} = \frac{\text{LCM}(Z_s \cdot Q, 2P_f \cdot Q)}{P_f \cdot Q}$$
 其中， LCM 为取最小公倍数运算，

$2P_f$ 为永磁磁极个数， Z_s 为电机初级铁心槽数， P_a 为电枢绕组极对数， Q 为使 $P_a \cdot Q$ 为整数的最小正整数。

[0012] 通过本发明所构思的以上技术方案，与现有技术相比，能够取得以下有益效果：

[0013] (1) 本发明所提出的电机结构取消了直线电机初级有效范围内磁极数为偶数的限制，引入了分数极概念，使永磁直线电机的定子有效长度内的永磁磁极数可以选择为分数，永磁直线电机的将有更多的极槽配合可供选择，增加了永磁直线电机的设计自由度。

[0014] (2) 本发明所提出的电机结构，可以有效降低电机的电磁推力波动和纵向磁拉力波动，减小直线电机在运行中的扰动，降低电机的控制难度，提高直线电机的控制精度和运行效率，缩短系统的响应时间。

[0015] (3) 本发明所提出的电机结构中，靠近端部的铁心齿的尺寸可以适当调整，引入了新的设计自由度，有利于直线电机在推力波动上的优化。

[0016] (4) 本发明提出了新的极槽配合，能够有效缩短电机的端部长度，提高电机效率和功率因数，降低电机制造成本，使直线电机系统更为紧凑，提高电机出力密度。

附图说明

[0017] 图1为由等效旋转电机设计直线电机的原理示意图；

[0018] 图2为本发明提出的一种分数极游标永磁直线电机的截面结构示意图及其绕组分布；

[0019] 图3为本发明提出的分数极游标永磁直线电机的空载磁场分布；

[0020] 图4为本发明提出的分数极游标永磁直线电机的槽电势星形图及其绕组分相；

[0021] 图5为电枢绕组的空载反电势波形示意图；

[0022] 图6为电枢绕组的空载反电势波形的谐波含量分布示意图；

[0023] 图7为所述两段式结构分数极游标永磁直线电机在不同负载情况下的平均电磁推力；

[0024] 图8为所述两段式结构分数极游标永磁直线电机在不同负载情况下纵向磁拉力波形。

[0025] 其中：1为电枢绕组，2为初级铁心轭部，3为初级铁心齿部，4为永磁磁极，5为次级铁心。

具体实施方式

[0026] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0027] 本发明引入了分数极概念,提出了一种分数极两相游标永磁直线电机,包括:电枢绕组,初级铁心轭部,初级铁心齿部,永磁磁极和次级铁心;

[0028] 电枢绕组环绕于所述初级铁心齿部之间的铁心槽内;所述永磁磁极均匀分布在次级铁心上,形成永磁体阵列,且相邻永磁磁极极性相反;

[0029] 电枢绕组、初级铁心齿部和初级铁心轭部共同组成游标永磁直线电机的初级;永磁体阵列与次级背铁组成游标永磁直线电机的次级;游标永磁直线电机的初级与次级之间存在气隙,使其之间可以相互移动;所述游标永磁直线电机初级有效范围内所对应次级的永磁磁极个数为分数;

[0030] 不考虑端部效应的条件下,每一个初级铁心槽中感应的电动势的幅值相等,波形相同,但在时间上相位不同。在电机设计过程中,常采用如图4所示的槽号星形图设计电机的极槽配合。槽号星形图中各矢量的编号和与之相对应的铁心槽的编号相同,编号前带有“-”表示该铁心槽内的导体为反向串联,其对应的槽电动势矢量也随之反向,反之即正向串联。矢量长度表示该槽感应电动势基波分量的幅值大小,矢量间的夹角为铁心槽内感应电动势之间的相位差(电角度)。如图4所示,将部分槽电势矢量反向后,本发明所述分数极两相游标永磁电机的槽号星形图可以对称地划分为A、B两个相带,对应电枢绕组中的A、B两相。

[0031] 在传统游标永磁直线电机中,各相绕组分配的原则满足以下原则:

$$\frac{Z_s}{\text{GCD}(Z_s, P_a)} = mk$$

其中 Z_s 为初级铁心槽数, P_a 为电枢绕组极数,GCD为取最大公约数运算, m 为电枢绕组相数, k 为任意整数。

[0032] 在引入分数磁极概念后,电枢绕组极数 P_a 不为整数,上述绕组分配关系式应改为:

$$\frac{Z_s \cdot Q}{\text{GCD}(Z_s \cdot Q, P_a \cdot Q)} = mk$$

其中, Q 为使 $P_a \cdot Q$ 为整数的最小正整数,特别的,对于传统游标永磁直线电机,有 $Q=1$,故可以将传统游标永磁直线电机当作本发明的一种特殊情况。

[0033] 进一步的,永磁磁极个数 $2P_f$ 、电机初级铁心槽数 Z_s 与电枢绕组极对数 P_a 满足磁场调制原理: $P_a = |P_f \pm Z_s|$ 。

[0034] 在引入分数极概念后,电机设计的自由度得到提高, P_a 所能取的值的范围得到扩充,其扩充后的可能的极槽配合及其绕组极对数如下所示:

Z_s	P_a	Q	mk	可用的相数 m	P_f		G		N_c	
					$ P_a - Z_s $	$ P_a + Z_s $	G^-	G^+		
[0035]	12	2	1	6	2, 3, 6	10.00	14.00	5.00	7.00	6
		2.1	10	40	2, 4, 5, 8, 10, 20, 40	9.90	14.10	4.71	6.71	40
		2.2	5	60	2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60	9.80	14.20	4.45	6.45	60
		2 1/3	3	36	2, 3, 4, 6, 9, 12, 18, 36	9.67	14.33	4.14	6.14	36
		2.25	4	16	2, 4, 8, 16	9.75	14.25	4.33	6.33	16
		2.5	2	24	2, 3, 4, 6, 8, 12, 24	9.50	14.50	3.80	5.80	24
		2.7	10	40	2, 4, 5, 8, 10, 20, 40	9.30	14.70	3.44	5.44	40
		2.75	4	48	2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 48	9.25	14.75	3.36	5.36	48
		2.8	5	30	2, 3, 5, 6, 10, 15, 30	9.20	14.80	3.29	5.29	30
		3	1	4	2, 4	9.00	15.00	3.00	5.00	4

[0036] 其中 N_c 为电磁力波动的基波相对于基波电频率的阶数,传统游标永磁直线电机中,该参数可以通过如下公式计算:

$$[0037] \quad N_c = \frac{LCM(Z_s, 2P_a)}{P_a} = \frac{LCM(Z_s, 2P_f)}{P_f} .$$

[0038] 引入分数极概念后,主要谐波次数的计算方式应改写为:

$$[0039] \quad N_c = \frac{LCM(Z_s \cdot Q, 2P_a \cdot Q)}{P_a \cdot Q} = \frac{LCM(Z_s \cdot Q, 2P_f \cdot Q)}{P_f \cdot Q} ,$$

其中LCM为取最小公倍数

运算。

[0040] 永磁直线电机初级所受的电磁推力 F_x 和纵向磁拉力 F_y 可以表示为:

$$[0041] \quad F_x(x) = \sum_{i=1}^{\infty} F_{xi} \cos(iN_c \frac{\pi}{\tau} x) ,$$

$$[0042] \quad F_y(x) = \sum_{i=1}^{\infty} F_{yi} \cos(iN_c \frac{\pi}{\tau} x) ;$$

[0043] 其中 F_{xi} , F_{yi} 分别为电磁推力和纵向磁拉力的 i 次谐波的幅值, τ 为永磁磁极极距。

[0044] 改写公式后,在分数极游标永磁直线电机的极槽配合的设计中, N_c 可以取得较传统游标永磁直线电机更大的值。因为电磁推力与纵向磁拉力的谐波幅值与谐波的次数成反比关系,所述分数极游标永磁直线电机的电磁推力和纵向磁拉力的波动较传统游标永磁直线电机有明显改善。

[0045] 分数极两相游标永磁直线电机采用双层短距绕组,但在电机初级边端的两个铁心槽中只设置了一层绕组,这使直线电机中靠近初级端部的铁心齿的尺寸可以适当调整,更有利于直线电机的推力波动的优化。

[0046] 所提出两相电机也有利于消除传统三相直线电机因端部效应造成的三相绕组不对称问题。由于直线电机两端磁路断开,其磁路参数与电机中间部分不同,而三相电机有三相绕组,最多只能有两相绕组放置于电机两个端部,这就造成了三相反电势、电感不对称的问题,进一步引起带载时的推力波动。而两相电机正好可以将两个端部平均分配给两相绕组,达到两相对称的效果,从而抑制了带载下的推力波动。综上,由于所理出奇数极两相游标永磁直线电机拥有天然较低的空载定位力波动,同时又实现了两相对称设计,使得电机

负载下推力波动较小,具有较大优势。

[0047] 本发明实施例中,随着奇数极概念的引入,可以有效缩短电机的端部长度,降低电极的绕组铜耗和漏磁,提高电机运行的效率和功率因数,同时也可以降低电机的制造成本。更短的端部也可以使直线电机系统更为紧凑,提高直线电机的推力密度。

[0048] 作为本发明的一个实施例,电机初级铁心为动子铁心,磁极铁心为定子铁心。

[0049] 作为本发明的另一个实施例,电机初级铁心为定子铁心,磁极铁心为动子铁心。

[0050] 通过本发明所构思的以上技术方案,与现有技术相比,能够取得以下有益效果:

[0051] 本发明所提出的电机结构取消了直线电机初级有效范围内磁极数为偶数的限制,引入了分数极概念,使永磁直线电机的动子有效长度内的永磁磁极数可以选择为分数,永磁直线电机的将有更多的极槽配合可供选择,增加了永磁直线电机设计自由度。

[0052] 本发明所提出的电机结构,可以有效降低电机的电磁推力波动和纵向磁拉力波动,减小直线电机在运行中的扰动,降低电机的控制难度,提高直线电机的控制精度和运行效率,缩短系统的响应时间。

[0053] 本发明所提出的电机结构中,靠近端部的铁心齿的尺寸可以适当调整,引入了新的设计自由度,有利于直线电机在推力波动上的优化。

[0054] 本发明提出了新的极槽配合,能够有效缩短电机的端部长度,提高电机效率和功率因数,降低电机制造成本,使直线电机系统更为紧凑,提高电机出力密度。

[0055] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0056] 参考图2,本发明实施例提供了一种分数极游标永磁直线电机,并通过槽电势图设置了极槽配合,包括:电枢绕组1、初级铁心轭部2、初级铁心齿3、永磁磁极4和次级铁心5;电枢绕组1环绕于所述初级铁心齿3;初级铁心轭部2与初级铁心齿3,构成电机初级铁心;多个相同大小的永磁磁极4均匀分布在所述次级铁心5上,形成永磁体阵列,且相邻永磁磁极极性相反;电枢绕组1、初级铁心轭部2和初级铁心齿3共同组成直线电机初级;永磁磁极4与磁极铁心5共同组成电机次级。电机初级与次级之间存在气隙,使初级与次级之间可以相互移动。

[0057] 本发明中的齿部可以看作永磁磁极的调制块,实现磁场调制的功能。电机初级铁心对应的有效永磁磁极数 $2P_f$ 、电机初级铁心槽数 Z_s 与电枢绕组极对数 P_a 满足磁场调制原理,即: $P_a = |Z_s \pm P_f|$ 。图2所述分数极游标永磁直线电机中,电机初级铁心槽数 $Z_s = 12$,初级所对应的有效永磁磁极数 $2P_f = 19.5$,根据游标永磁直线电机的原理,可知永磁磁场经由分裂齿调制后产生的电枢绕组极对数为 $P_a = |9.75 - 12| = 2.25$,与电枢绕组进行耦合,经过调制的磁场分布如图3所示,所述12槽19.5极分数极游标永磁直线电机的槽矢量图和绕组排布如图4所示。

[0058] 本发明中的分数极游标永磁直线电机为两相电机,绕组反电动势及其谐波分析分别如图5、6所示。所述分数极游标永磁直线电机的电磁推力存在较大二次波动,可以通过采取两段式结构消除。所述两段式分数极游标永磁直线电机在不同负载情况下的水平电磁推力和纵向磁拉力波形分别如图7、8所示。

[0059] 本发明中电机初级铁心可为动子铁心,相应地,次级铁心为定子铁心;电机初级铁

心也可为定子铁心,相应地,次级铁心为动子铁心。

[0060] 本发明中的电机槽数 Z_s 为等效槽数,即槽电势星形图中的槽矢量个数。

[0061] 本发明提供的电机可在包括但不限于传送系统、伺服系统、抽油机、电磁弹射装置、绘图仪、电梯、波浪能发电系统等需要大推力或高动态响应的直线运动的场合中应用。

[0062] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

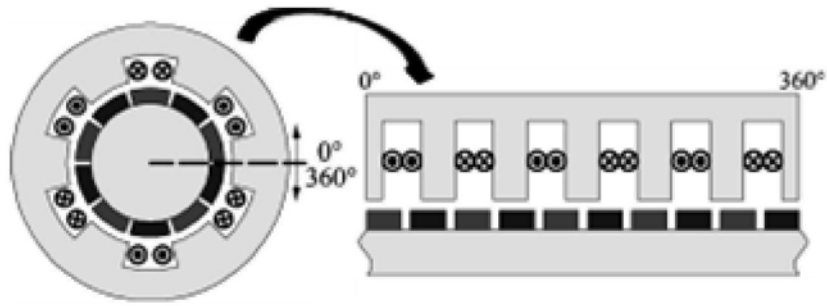


图1

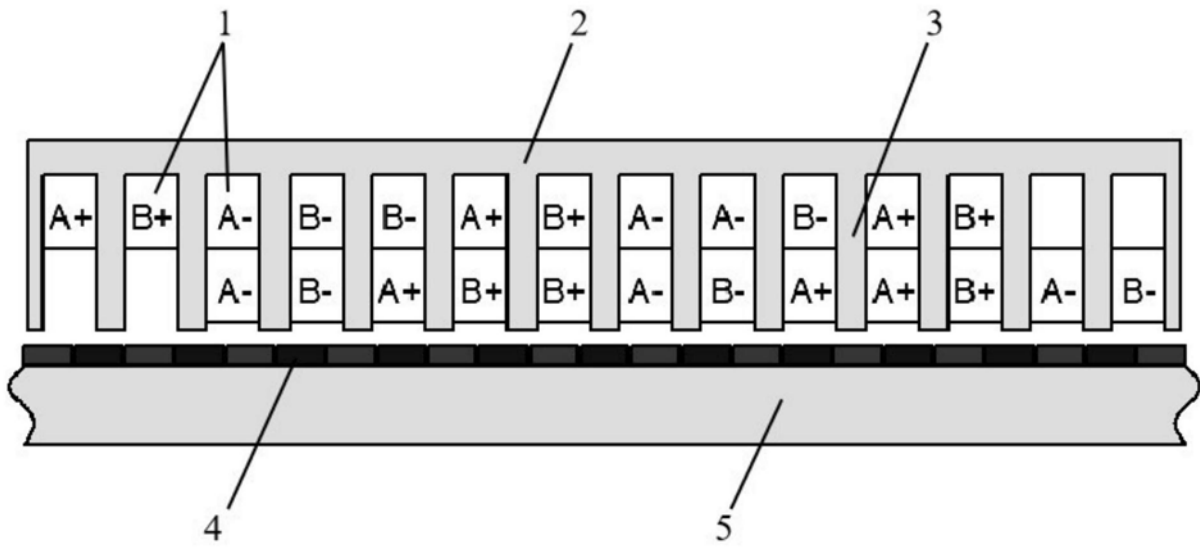


图2

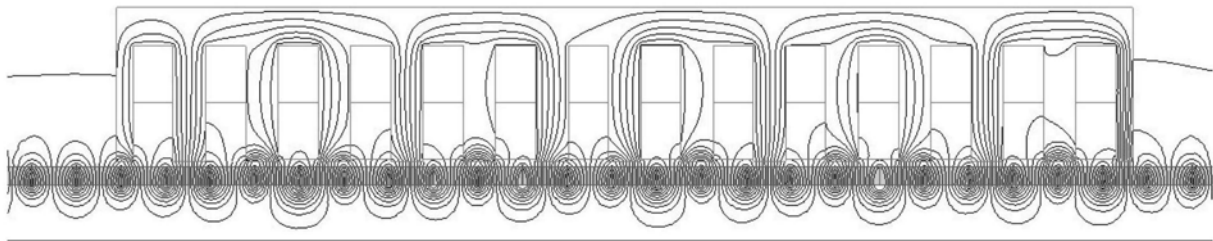


图3

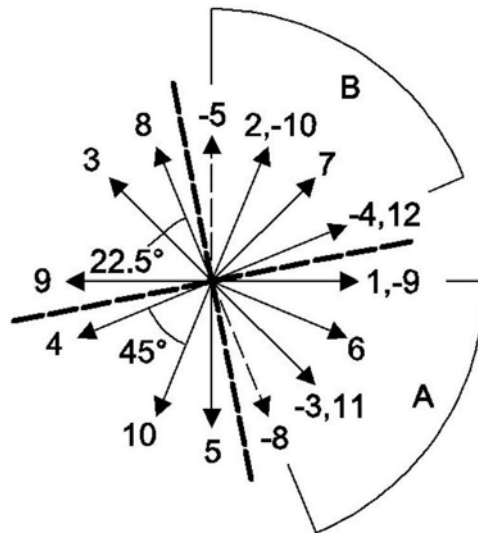


图4

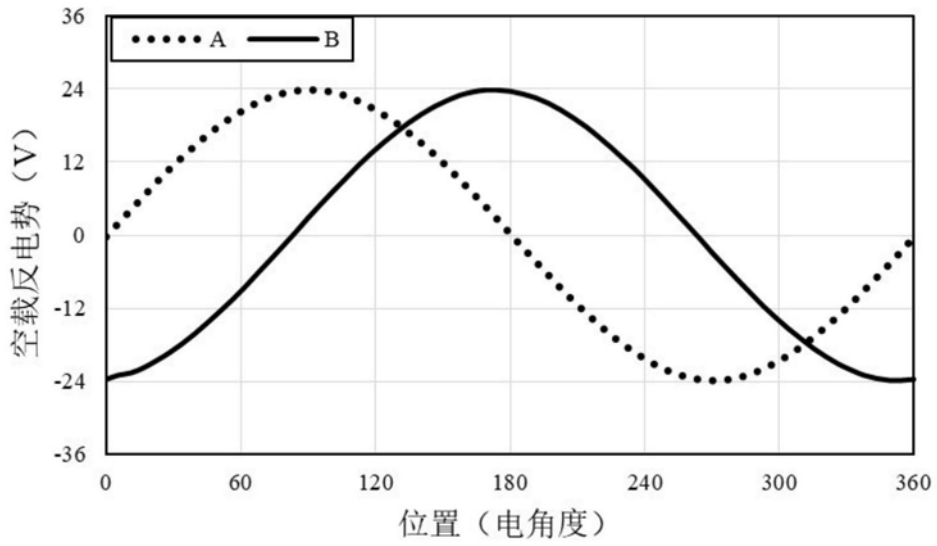


图5

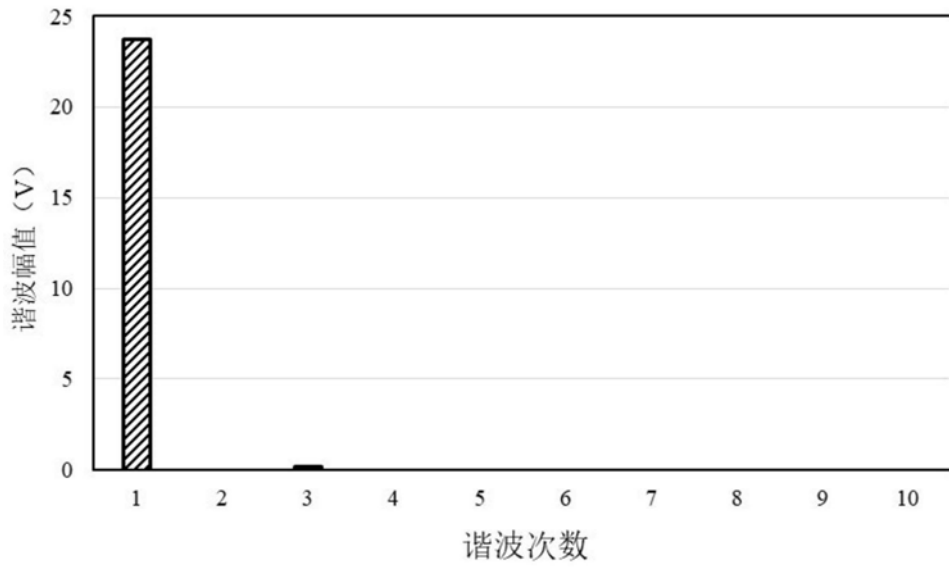


图6

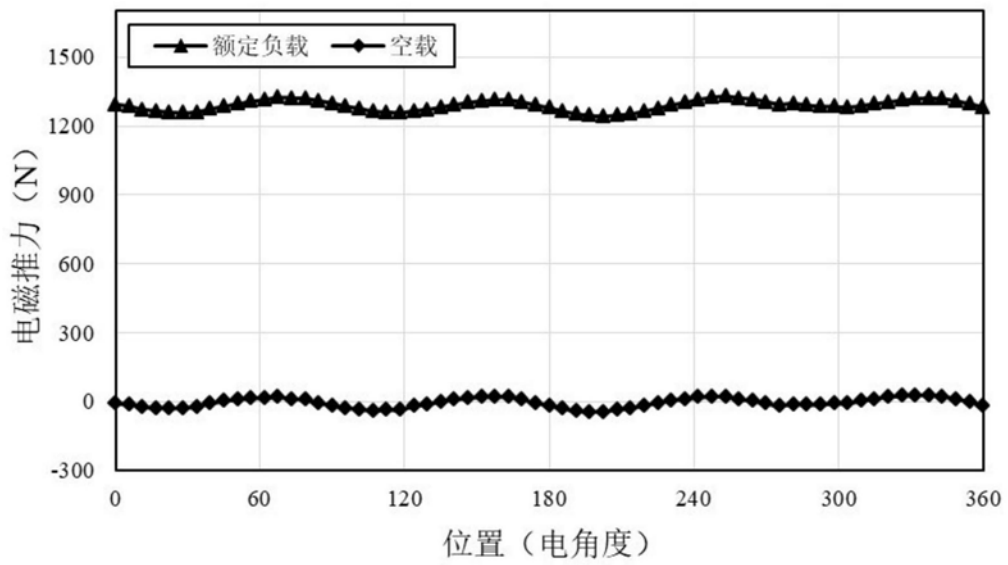


图7

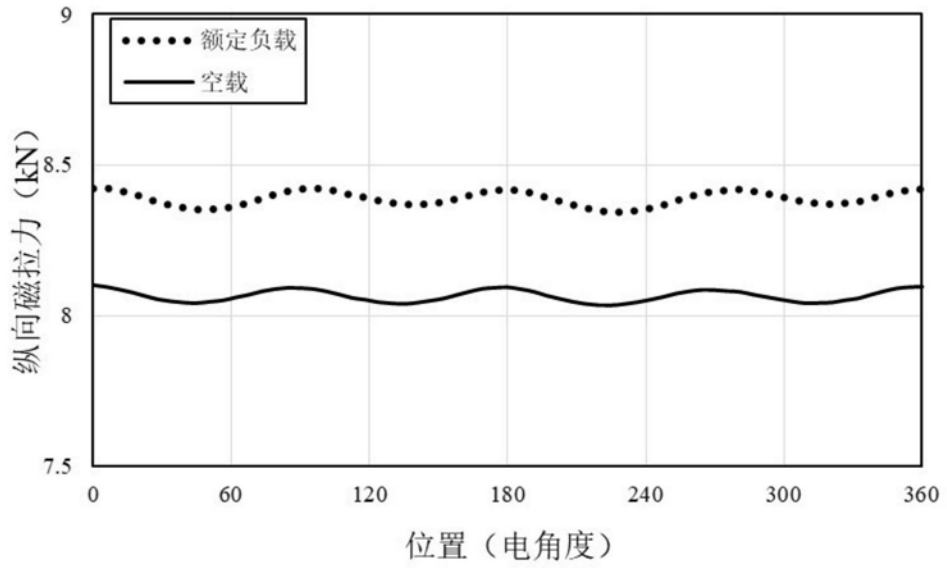


图8