



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106936338 A

(43)申请公布日 2017. 07. 07

(21)申请号 201710231354.0

(22)申请日 2017.04.11

(71)申请人 南京邮电大学

地址 210046 江苏省南京市亚东新城区文苑路9号

(72)发明人 刘泽远 蔡骏 杨艳 曹鑫
邓智泉 郭前岗

(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 朱小兵

(51)Int.Cl.

H02N 15/00(2006.01)

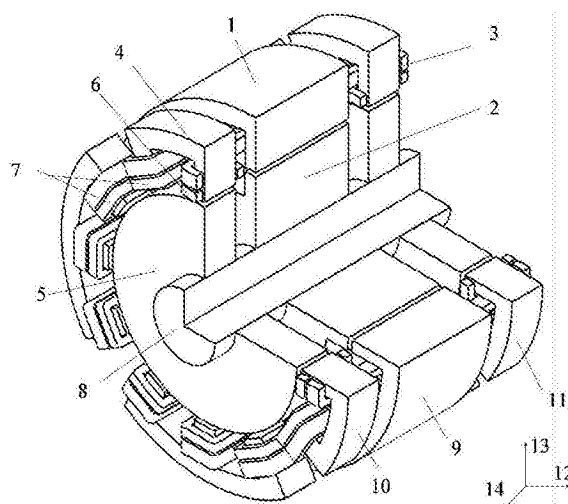
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54)发明名称

一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机及控制方法

(57)摘要

本发明公布了一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机及控制方法,所述电机由一个开关磁阻电机和两个径向磁轴承构成;磁轴承定子为4个E型结构组成,且每个E结构中间齿上绕有1个悬浮绕组和1个电枢绕组,另外两齿绕组分别绕有1个偏置绕组和1个电枢绕组;开关磁阻电机每个齿上绕有1个电枢绕组;电枢绕组横跨两磁轴承定子和开关磁阻电机定子,A相电枢绕组单独为一相,B、C相电枢绕组与偏置绕组串联一起构成另两相;转矩控制与传统开关磁阻电机控制方式相同;每个磁轴承的某个方向悬浮力仅与三相电枢绕组电流和该方向悬浮电流有关,转矩与悬浮力间、及径向悬浮力间均可解耦控制,悬浮控制简单,且悬浮力输出均衡对称。



1. 一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机,所述电机包括径向磁轴承I、开关磁阻电机和径向磁轴承II;所述径向磁轴承I和径向磁轴承II分别布置在开关磁阻电机的两侧;所述径向磁轴承I由磁轴承定子I、磁轴承转子I、偏置绕组I和悬浮绕组I构成;

所述径向磁轴承II由磁轴承定子II、磁轴承转子II、偏置绕组II和悬浮绕组II构成;

所述开关磁阻电机由磁阻电机定子、磁阻电机转子、电枢绕组构成;

所述磁轴承转子I布置在磁轴承定子I内,磁阻电机转子布置在磁阻电机定子内,磁轴承转子II布置在磁轴承定子II内;所述磁轴承转子I、磁阻电机转子和磁轴承转子II套在转轴上;所述磁轴承定子I、磁阻电机定子和磁轴承定子II串联布置,且磁轴承定子I和磁轴承定子II布置于磁阻电机定子的两侧,磁轴承定子I与磁阻电机定子间存在间隙,磁阻电机定子与磁轴承定子II间存在间隙;

所述磁阻电机定子和磁阻电机转子均为凸极结构,磁阻电机定子的齿数12,磁阻电机转子的齿数为8,且所述开关磁阻电机为三相工作制;

所述磁轴承定子I由4个E型结构I构成,4个E型结构I均匀分布,每个E型结构I之间相差 90° ;每个E型结构I的齿数为3,齿与齿之间相差 30° ;E型结构I的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置,且E型结构I的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等;所述磁轴承转子I为圆柱结构;

所述磁轴承定子II由4个E型结构II构成,4个E型结构II均匀分布,每个E型结构II之间相差 90° ;每个E型结构II的齿数为3,齿与齿之间相差 30° ;E型结构II的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置,且E型结构II的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等;所述磁轴承转子II为圆柱结构;

其特征在于,所述电枢绕组的缠绕方式为:处于同一圆周位置上的磁轴承定子I的1个齿、磁阻电机定子的1个齿和磁轴承定子II的1个齿,共同绕有1个电枢绕组,共12个;

所述悬浮绕组I的缠绕方式为:每个磁轴承定子I的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组I,共4个悬浮绕组I;

所述偏置绕组I的缠绕方式为:每个磁轴承定子I的两个边齿上各绕有1个偏置绕组I,共8个偏置绕组I;

所述悬浮绕组II的缠绕方式为:每个磁轴承定子II的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组II,共4个悬浮绕组II;

所述偏置绕组II的缠绕方式为:每个磁轴承定子II的两个边齿上各绕有1个偏置绕组II,共8个偏置绕组II;

所述电枢绕组、偏置绕组I和偏置绕组II的匝数相等;

所述电枢绕组的连接方式为:处于水平方向的2个电枢绕组和处于竖直方向的2个电枢绕组串联,构成A相电枢绕组;

圆周位置上与A相电枢绕组相差 30° 的4个电枢绕组串联,构成B相电枢绕组串;

圆周位置上与A相电枢绕组相差 60° 的4个电枢绕组串联,构成C相电枢绕组串;

所述磁轴承定子I的偏置绕组I连接方式为:与A相电枢绕组相差 30° 的4个偏置绕组I串联,构成C相偏置绕组串I;与A相电枢绕组相差 60° 的4个偏置绕组I串联,构成B相偏置绕组串I;

所述磁轴承定子II的偏置绕组II连接方式为:与A相电枢绕组相差 30° 的4个偏置绕组

II 串联,构成C相偏置绕组串 II;与A相电枢绕组相差 60° 的4个偏置绕组 II 串联,构成B相偏置绕组串 II;

所述B相电枢绕组串、B相偏置绕组串 I 和B相偏置绕组串 II 串联,构成B相电枢绕组;

所述C相电枢绕组串、C相偏置绕组串 I 和C相偏置绕组串 II 串联,构成C相电枢绕组;

所述磁轴承定子 I 的悬浮绕组 I 连接方式为:在水平方向E型结构 I 的2个悬浮绕组 I 串联,构成1个水平方向悬浮绕组 I;在竖直方向E型结构 I 的2个悬浮绕组 I 串联,构成1个竖直方向悬浮绕组 I;

所述磁轴承定子 II 的悬浮绕组 II 连接方式为:在水平方向E型结构 II 的2个悬浮绕组 II 串联,构成1个水平方向悬浮绕组 II;在竖直方向E型结构 II 的2个悬浮绕组 II 串联,构成1个竖直方向悬浮绕组 II。

2. 根据权利要求1所述的一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的控制方法,其特征在于,所述电机包括一个开关磁阻电机和两个径向磁轴承,其中开关磁阻电机产生旋转转矩,两个径向磁轴承产生4个径向悬浮力,以实现磁阻电机转子四个径向的悬浮运行;所述电机绕组由三相电枢绕组和四个悬浮绕组构成,其中独立控制三相电枢绕组电流,以调节转矩,并产生对称的偏置磁通,从而保证三相绕组单独励磁时输出的径向悬浮力对称;独立控制四个悬浮绕组电流,实现四自由度悬浮调节,并且实现转矩与径向悬浮力间的解耦,以及径向悬浮力间的解耦;所述控制方法包括如下步骤:

步骤A,获取开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ;具体步骤如下:

步骤A-1,采集磁阻电机转子实时转速,得到转子角速度 ω ;

步骤A-2,将磁阻电机转子角速度 ω 与设定的参考角速度 ω^* 相减,得到转速差 $\Delta\omega$;

步骤A-3,所述转速差 $\Delta\omega$,通过比例积分控制器,获得开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ;

步骤B,获取径向磁轴承 I 的x轴和y轴方向给定悬浮力;其具体步骤如下:

步骤B-1,获取磁轴承转子 I 的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_1 和 β_1 ,其中,x轴为水平方向,y轴为竖直方向;

步骤B-2,将实时位移信号 α_1 和 β_1 分别与给定的参考位移信号 α_1^* 和 β_1^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$ 分别经过比例积分微分控制器,分别得到径向磁轴承 I 的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha_1}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta_1}^*$;

步骤C,获取径向磁轴承 II 的x轴和y轴方向给定悬浮力;其具体步骤如下:

步骤C-1,获取磁轴承转子 II 的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_2 和 β_2 ;

步骤C-2,将实时位移信号 α_2 和 β_2 分别与给定的参考位移信号 α_2^* 和 β_2^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$ 分别经过比例积分微分控制器,分别得到径向磁轴承 II 的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha_2}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta_2}^*$;

步骤D,调节悬浮力,具体步骤如下:

步骤D-1,采集3相实时的电枢绕组电流,根据所述悬浮力 $F_{\alpha_1}^*$ 和 $F_{\beta_1}^*$,以及公式 $F_{\alpha_1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s1}^*$ 和 $F_{\beta_1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s2}^*$,得到径向磁轴承 I 的x轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;其中, k_f 为悬浮力系数,

$k_{f1} = \frac{2\mu_0 lr \alpha_s}{9\delta^2} (4 + \sqrt{3})$, μ_0 为真空磁导率, l 为径向磁轴承的轴向长度, r 为磁轴承转子的半径, α_s 为径向磁轴承E型结构定子的极弧角, δ 为径向磁轴承的单边气隙长度, N_b 、 N_s 分别电枢绕组和径向悬浮绕组的匝数, i_1 、 i_2 和 i_3 分别为三相电枢绕组电流;

步骤D-2, 根据所述悬浮力 $F_{\alpha 2}^*$ 和 $F_{\beta 2}^*$, 以及计算公式 $F_{\alpha 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s3}^*$ 和 $F_{\beta 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s4}^*$, 解算得到径向磁轴承 II 的 x 轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* 和 y 轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

步骤D-3, 利用电流斩波控制方法, 用径向磁轴承 I 的 x 轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s1} 跟踪该方向悬绕组电流参考值 i_{s1}^* , 用 y 轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s2} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;

用径向磁轴承 II 的 x 轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s3} 跟踪该方向悬绕组电流参考值 i_{s3}^* , 用 y 轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s4} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

步骤E, 调节转矩; 通过调节开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 的取值, 从而实时调节转矩。

一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机及控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机及控制方法,属于电机类的磁悬浮开关磁阻电机及其控制技术领域。

背景技术

[0002] 无轴承开关磁阻电机,不仅具有磁轴承无摩擦、无润滑等优点,还继承了开关磁阻电机的高速适应性和满足苛刻工作环境等特点,在航空航天、飞轮储能和军事等场合具有独特优势。

[0003] 四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机是一种新型磁悬浮电机,该电机可实现转矩和悬浮力的自然解耦,并利用开关磁阻电机的电枢绕组电流在磁轴承内产生的磁通,作为产生悬浮力所需的偏置磁通;另外由于磁轴承与开关磁阻电机相互隔离,悬浮运行对电动旋转运行无影响。然而,由于三相电枢电流轮流作为产生偏置磁通的电流,因受E型磁轴承定子所限,一相导通时产生的偏置磁通与另外两相不同,导致该悬浮电机输出的悬浮力不均衡,从而影响悬浮运行的平稳性和高速悬浮精度。

发明内容

[0004] 本发明为了克服现有技术的不足,提出一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机及控制方法。所述电机是一种悬浮控制简单、悬浮系统成本低、且偏置绕组与磁阻电机绕组采用串联共励式的四自由度磁悬浮开关磁阻电机;另外,由于在E型磁轴承定子中的两边定子齿上分别增加了一套绕组,其匝数与电枢绕组相同,并与相对于的另两相电枢绕组串联,从而改善偏置磁通的分布,使得三相电枢绕组单独励磁时悬浮力输出均衡对称;所述控制方法可独立控制电枢绕组电流和悬浮绕组电流,旋转和悬浮系统间相互解耦,彼此影响弱;四自由度悬浮控制类似磁悬浮轴承,采用恒导通控制策略,并且仅需控制四个方向悬浮绕组电流,即可产生所需的四个方向悬浮力,控制变量少。

[0005] 为了解决上述问题,本发明采用的技术方案为:

[0006] 一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机,所述电机包括径向磁轴承I、开关磁阻电机和径向磁轴承II;所述径向磁轴承I和径向磁轴承II分别布置在开关磁阻电机的两侧;

[0007] 所述径向磁轴承I由磁轴承定子I、磁轴承转子I、偏置绕组I和悬浮绕组I构成;

[0008] 所述径向磁轴承II由磁轴承定子II、磁轴承转子II、偏置绕组II和悬浮绕组II构成;

[0009] 所述开关磁阻电机由磁阻电机定子、磁阻电机转子、电枢绕组构成;

[0010] 所述磁轴承转子I布置在磁轴承定子I内,磁阻电机转子布置在磁阻电机定子内,磁轴承转子II布置在磁轴承定子II内;所述磁轴承转子I、磁阻电机转子和磁轴承转子II套在转轴上;所述磁轴承定子I、磁阻电机定子和磁轴承定子II串联布置,且磁轴承定子I和磁轴承定子II布置于磁阻电机定子的两侧,磁轴承定子I与磁阻电机定子间存在间隙,磁阻电

机定子与磁轴承定子 II 间存在间隙；

[0011] 所述磁阻电机定子和磁阻电机转子均为凸极结构，磁阻电机定子的齿数12，磁阻电机转子的齿数为8，且所述开关磁阻电机为三相工作制；

[0012] 所述磁轴承定子 I 由4个E型结构 I 构成，4个E型结构 I 均匀分布，每个E型结构 I 之间相差 90° ；每个E型结构 I 的齿数为3，齿与齿之间相差 30° ；E型结构 I 的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置，且E型结构 I 的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等；所述磁轴承转子 I 为圆柱结构；

[0013] 所述磁轴承定子 II 由4个E型结构 II 构成，4个E型结构 II 均匀分布，每个E型结构 II 之间相差 90° ；每个E型结构 II 的齿数为3，齿与齿之间相差 30° ；E型结构 II 的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置，且E型结构 II 的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等；所述磁轴承转子 II 为圆柱结构；

[0014] 所述电枢绕组的缠绕方式为：处于同一圆周位置上的磁轴承定子 I 的1个齿、磁阻电机定子的1个齿和磁轴承定子 II 的1个齿，共同绕有1个电枢绕组，共12个；

[0015] 所述悬浮绕组 I 的缠绕方式为：每个磁轴承定子 I 的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组 I，共4个悬浮绕组 I；

[0016] 所述偏置绕组 I 的缠绕方式为：每个磁轴承定子 I 的两个边齿上各绕有1个偏置绕组 I，共8个偏置绕组 I；

[0017] 所述悬浮绕组 II 的缠绕方式为：每个磁轴承定子 II 的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组 II，共4个悬浮绕组 II；

[0018] 所述偏置绕组 II 的缠绕方式为：每个磁轴承定子 II 的两个边齿上各绕有1个偏置绕组 II，共8个偏置绕组 II；

[0019] 所述电枢绕组、偏置绕组 I 和偏置绕组 II 的匝数相等；

[0020] 所述电枢绕组的连接方式为：处于水平方向的2个电枢绕组和处于竖直方向的2个电枢绕组串联，构成A相电枢绕组；

[0021] 圆周位置上与A相电枢绕组相差 30° 的4个电枢绕组串联，构成B相电枢绕组串；

[0022] 圆周位置上与A相电枢绕组相差 60° 的4个电枢绕组串联，构成C相电枢绕组串；

[0023] 所述磁轴承定子 I 的偏置绕组 I 连接方式为：与A相电枢绕组相差 30° 的4个偏置绕组 I 串联，构成C相偏置绕组串 I；与A相电枢绕组相差 60° 的4个偏置绕组 I 串联，构成B相偏置绕组串 I；

[0024] 所述磁轴承定子 II 的偏置绕组 II 连接方式为：与A相电枢绕组相差 30° 的4个偏置绕组 II 串联，构成C相偏置绕组串 II；与A相电枢绕组相差 60° 的4个偏置绕组 II 串联，构成B相偏置绕组串 II；

[0025] 所述B相电枢绕组串、B相偏置绕组串 I 和B相偏置绕组串 II 串联，构成B相电枢绕组；

[0026] 所述C相电枢绕组串、C相偏置绕组串 I 和C相偏置绕组串 II 串联，构成C相电枢绕组；

[0027] 所述磁轴承定子 I 的悬浮绕组 I 连接方式为：在水平方向E型结构 I 的2个悬浮绕组 I 串联，构成1个水平方向悬浮绕组 I；在竖直方向E型结构 I 的2个悬浮绕组 I 串联，构成1个竖直方向悬浮绕组 I；

[0028] 所述磁轴承定子 II 的悬浮绕组 II 连接方式为:在水平方向E型结构 II 的2个悬浮绕组 II 串联,构成1个水平方向悬浮绕组 II ;在竖直方向E型结构 II 的2个悬浮绕组 II 串联,构成1个竖直方向悬浮绕组 II 。

[0029] 所述一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的控制方法,所述电机包括一个开关磁阻电机和两个径向磁轴承,其中开关磁阻电机产生旋转转矩,两个径向磁轴承产生4个径向悬浮力,以实现转子四个径向的悬浮运行;所述电机绕组由三相电枢绕组和四个悬浮绕组构成,其中独立控制三相电枢绕组电流,以调节转矩,并产生对称的偏置磁通,从而保证三相绕组单独励磁时输出的径向悬浮力对称;独立控制四个悬浮绕组电流,实现四自由度悬浮调节,并且实现转矩与径向悬浮力间的解耦,以及径向悬浮力间的解耦;所述控制方法包括如下步骤:

[0030] 步骤A,获取开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ;具体步骤如下:

[0031] 步骤A-1,采集磁阻电机转子实时转速,得到转子角速度 ω ;

[0032] 步骤A-2,将磁阻电机转子角速度 ω 与设定的参考角速度 ω^* 相减,得到转速差 $\Delta\omega$;

[0033] 步骤A-3,所述转速差 $\Delta\omega$,通过比例积分控制器,获得开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ;

[0034] 步骤B,获取径向磁轴承I的x轴和y轴方向给定悬浮力;其具体步骤如下:

[0035] 步骤B-1,获取磁轴承转子I的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_1 和 β_1 ,其中,x轴为水平方向,y轴为竖直方向;

[0036] 步骤B-2,将实时位移信号 α_1 和 β_1 分别与给定的参考位移信号 α_1^* 和 β_1^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$ 分别经过比例积分微分控制器,分别得到径向磁轴承I的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha_1}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta_1}^*$;

[0037] 步骤C,获取径向磁轴承II的x轴和y轴方向给定悬浮力;其具体步骤如下:

[0038] 步骤C-1,获取磁轴承转子II的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_2 和 β_2 ;

[0039] 步骤C-2,将实时位移信号 α_2 和 β_2 分别与给定的参考位移信号 α_2^* 和 β_2^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$ 分别经过比例积分微分控制器,分别得到径向磁轴承II的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha_2}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta_2}^*$;

[0040] 步骤D,调节悬浮力,具体步骤如下:

[0041] 步骤D-1,采集3相实时的电枢绕组电流,根据所述悬浮力 $F_{\alpha_1}^*$ 和 $F_{\beta_1}^*$,以及公式 $F_{\alpha_1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s1}^*$ 和 $F_{\beta_1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s2}^*$,得到径向磁轴承I的x轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;其中, k_f 为悬浮力系数, $k_{f1} = \frac{2\mu_0 l r \alpha_s}{9\delta^2} (4 + \sqrt{3})$, μ_0 为真空磁导率, l 为径向磁轴承的轴向长度, r 为磁轴承转子的半径, α_s 为径向磁轴承E型结构定子的极弧角, δ 为径向磁轴承的单边气隙长度, N_b 、 N_s 分别电枢绕组和径向悬浮绕组的匝数, i_1 、 i_2 和 i_3 分别为三相电枢绕组电流;

[0042] 步骤D-2,根据所述悬浮力 $F_{\alpha_2}^*$ 和 $F_{\beta_2}^*$,以及计算公式 $F_{\alpha_2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s3}^*$

和 $F_{\beta 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s4}^*$, 解算得到径向磁轴承 II 的 x 轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* 和 y 轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

[0043] 步骤 D-3, 利用电流斩波控制方法, 用径向磁轴承 I 的 x 轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s1} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* , 用 y 轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s2} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;

[0044] 用径向磁轴承 II 的 x 轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s3} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* , 用 y 轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s4} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

[0045] 步骤 E, 调节转矩; 通过调节开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 的取值, 从而实时调节转矩。

[0046] 本发明的有益效果: 本发明提出了一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的绕组连接方式及控制方法, 采用本发明的技术方案, 能够达到如下技术效果:

[0047] (1) 可实现四自由度悬浮运行, 悬浮力和转矩解耦, 高速悬浮性能好;

[0048] (2) 采用电枢绕组与偏置绕组串联共同励磁的方式, 电流利用率高;

[0049] (3) 三相电枢绕组产生的磁通作为偏置磁通, 只需控制四个悬浮绕组电流, 不需要为悬浮运行而控制电枢绕组电流, 便可产生四个方向所需悬浮力, 控制变量少, 悬浮控制简单, 悬浮系统功率变换器成本小;

[0050] (4) 转矩控制与开关磁阻电机完全相同, 控制简单, 可充分励磁, 转矩输出特性好, 且高速适应性强;

[0051] (5) 各相悬浮磁路分离, 轴向和径向悬浮磁路隔离, 且转矩磁路与悬浮磁路也隔离, 磁路耦合性弱;

[0052] (6) 解决了现有的四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机悬浮力输出不均衡问题, 以及径向悬浮力间的耦合问题。

附图说明

[0053] 图1是本发明四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的三维结构示意图。

[0054] 图2是本发明A相电枢绕组和两个径向悬浮绕组I在径向磁轴承I部分的连接方式示意图。

[0055] 图3是本发明B和C相电枢绕组在径向磁轴承I部分的连接方式示意图。

[0056] 图4是本发明径向磁轴承I的磁通分布图。

[0057] 图5是本发明四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机控制方法的系统框图。

[0058] 图6是本发明悬浮绕组电流计算方法框图。

[0059] 附图标记说明: 图1至图6中, 1是磁阻电机定子, 2是磁阻电机转子, 3是电枢绕组, 4是磁轴承定子, 5是磁轴承转子, 6是悬浮绕组, 7是偏置绕组, 8是转轴, 9是12/8极开关磁阻电机, 10是径向磁轴承I, 11是径向磁轴承II, 12、13、14分别为x、y、z轴方向坐标轴的正方向, 15是A相电枢绕组的流入电流 i_{1+} , 16是A相电枢绕组的流出电流 i_{1-} , 17是径向磁轴承I的x方向悬浮绕组的流入电流 i_{s1+} , 18是径向磁轴承I的x方向悬浮绕组的流入电流 i_{s1-} , 19是径向磁轴承I的y方向悬浮绕组的流入电流 i_{s2+} , 20是径向磁轴承I的y方向悬浮绕组的流入电流 i_{s2-} , 21是B相电枢绕组的流入电流 i_{2+} , 22是B相电枢绕组的流出电流 i_{2-} , 23是C相电枢绕组的流入电流 i_{3+} , 24是A相电枢绕组的流出电流 i_{3-} , 25是气隙1, 26是气隙2, 27是气隙3,

28是气隙4,29为三相电枢绕组在径向磁轴承I内产生的偏置磁通,30为悬浮绕组I在径向磁轴承I内产生的磁通。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图,对本发明一种四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的绕组连接方式及控制方法的技术方案进行详细说明:

[0061] 如图1所示,是本发明四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的三维结构示意图,其中,1是磁阻电机定子,2是磁阻电机转子,3是电枢绕组,4是磁轴承定子,5是磁轴承转子,6是悬浮绕组,7是偏置绕组,8是转轴,9是12/8极开关磁阻电机,10是径向磁轴承I,11是径向磁轴承II,12、13、14分别为x、y、z轴方向坐标轴的正方向。

[0062] 所述四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机,包括径向磁轴承I、开关磁阻电机和径向磁轴承II;所述径向磁轴承I和径向磁轴承II分别布置在开关磁阻电机的两侧;

[0063] 所述径向磁轴承I由磁轴承定子I、磁轴承转子I、偏置绕组I和悬浮绕组I构成;

[0064] 所述径向磁轴承II由磁轴承定子II、磁轴承转子II、偏置绕组II和悬浮绕组II构成;

[0065] 所述开关磁阻电机由磁阻电机定子、磁阻电机转子、电枢绕组构成;

[0066] 所述磁轴承转子I布置在磁轴承定子I内,磁阻电机转子布置在磁阻电机定子内,磁轴承转子II布置在磁轴承定子II内;所述磁轴承转子I、磁阻电机转子和磁轴承转子II套在转轴上;所述磁轴承定子I、磁阻电机定子和磁轴承定子II串联布置,且磁轴承定子I和磁轴承定子II布置于磁阻电机定子的两侧,磁轴承定子I与磁阻电机定子间存在间隙,磁阻电机定子与磁轴承定子II间存在间隙;

[0067] 所述磁阻电机定子和磁阻电机转子均为凸极结构,磁阻电机定子的齿数12,磁阻电机转子的齿数为8,且所述开关磁阻电机为三相工作制;

[0068] 所述磁轴承定子I由4个E型结构I构成,4个E型结构I均匀分布,每个E型结构I之间相差 90° ;每个E型结构I的齿数为3,齿与齿之间相差 30° ;E型结构I的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置,且E型结构I的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等;所述磁轴承转子I为圆柱结构;

[0069] 所述磁轴承定子II由4个E型结构II构成,4个E型结构II均匀分布,每个E型结构II之间相差 90° ;每个E型结构II的齿数为3,齿与齿之间相差 30° ;E型结构II的每个齿与所述磁阻电机定子齿处于对齐位置,且E型结构II的定子齿与磁阻电机定子齿的齿宽相等;所述磁轴承转子II为圆柱结构;

[0070] 所述电枢绕组的缠绕方式为:处于同一圆周位置上的磁轴承定子I的1个齿、磁阻电机定子的1个齿和磁轴承定子II的1个齿,共同绕有1个电枢绕组,共12个;

[0071] 所述悬浮绕组I的缠绕方式为:每个磁轴承定子I的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组I,共4个悬浮绕组I;

[0072] 所述偏置绕组I的缠绕方式为:每个磁轴承定子I的两个边齿上各绕有1个偏置绕组I,共8个偏置绕组I;

[0073] 所述悬浮绕组II的缠绕方式为:每个磁轴承定子II的中间定子齿上绕有1个悬浮绕组II,共4个悬浮绕组II;

[0074] 所述偏置绕组 II 的缠绕方式为:每个磁轴承定子 II 的两个边齿上各绕有 1 个偏置绕组 II,共 8 个偏置绕组 II;

[0075] 所述电枢绕组、偏置绕组 I 和偏置绕组 II 的匝数相等;

[0076] 所述电枢绕组的连接方式为:处于水平方向的 2 个电枢绕组和处于竖直方向的 2 个电枢绕组串联,构成 A 相电枢绕组;

[0077] 圆周位置上与 A 相电枢绕组相差 30° 的 4 个电枢绕组串联,构成 B 相电枢绕组串;

[0078] 圆周位置上与 A 相电枢绕组相差 60° 的 4 个电枢绕组串联,构成 C 相电枢绕组串;

[0079] 所述磁轴承定子 I 的偏置绕组 I 连接方式为:与 A 相电枢绕组相差 30° 的 4 个偏置绕组 I 串联,构成 C 相偏置绕组串 I;与 A 相电枢绕组相差 60° 的 4 个偏置绕组 I 串联,构成 B 相偏置绕组串 I;

[0080] 所述磁轴承定子 II 的偏置绕组 II 连接方式为:与 A 相电枢绕组相差 30° 的 4 个偏置绕组 II 串联,构成 C 相偏置绕组串 II;与 A 相电枢绕组相差 60° 的 4 个偏置绕组 II 串联,构成 B 相偏置绕组串 II;

[0081] 所述 B 相电枢绕组串、B 相偏置绕组串 I 和 B 相偏置绕组串 II 串联,构成 B 相电枢绕组;

[0082] 所述 C 相电枢绕组串、C 相偏置绕组串 I 和 C 相偏置绕组串 II 串联,构成 C 相电枢绕组;

[0083] 所述磁轴承定子 I 的悬浮绕组 I 连接方式为:在水平方向 E 型结构 I 的 2 个悬浮绕组 I 串联,构成 1 个水平方向悬浮绕组 I;在竖直方向 E 型结构 I 的 2 个悬浮绕组 I 串联,构成 1 个竖直方向悬浮绕组 I;

[0084] 所述磁轴承定子 II 的悬浮绕组 II 连接方式为:在水平方向 E 型结构 II 的 2 个悬浮绕组 II 串联,构成 1 个水平方向悬浮绕组 II;在竖直方向 E 型结构 II 的 2 个悬浮绕组 II 串联,构成 1 个竖直方向悬浮绕组 II。

[0085] 所述三相电枢绕组电流产生的合成磁通,作为两个径向磁轴承的偏置磁通;三相电枢绕组电流的控制方法与传统开关磁阻电机相同;控制 x 和 y 方向的四个悬浮绕组电流的大小和方向,进而可产生径向悬浮所需的大小和方向均可控的四个径向磁拉力,进而实现转子的径向四自由度悬浮运行。

[0086] 图 2 为本发明 A 相电枢绕组和两个径向悬浮绕组 I 在径向磁轴承 I 部分的连接方式示意图。处于水平方向和竖直方向的四个电枢串联一起,构成 A 相电枢绕组,其每个电枢绕组在空间上相隔 90° ;

[0087] A 相电枢绕组电流产生的四极对称磁通,呈 NSNS 分布。当 A 相电枢绕组导通时,在磁阻电机内产生的磁场,用于产生转矩;A、B、C 三相电枢绕组在磁轴承内产生的合成磁场用于悬浮控制的偏置磁场。B 相电枢绕组串、C 相电枢绕组串与 A 相电枢绕组结构相同,仅在位置上与 A 相相差 30° 和 -30° 。

[0088] 图 3 是本发明 B 和 C 相电枢绕组在径向磁轴承 I 部分的连接方式示意图。

[0089] 在径向磁轴承 I 内,与 A 相电枢绕组相差 30° 的 4 个偏置绕组 I 串联,构成 C 相偏置绕组串 I;与 A 相电枢绕组相差 60° 的 4 个偏置绕组 I 串联,构成 B 相偏置绕组串 I;

[0090] 同样的方式,可得到径向磁轴承 II 内的 B 相偏置绕组串 II 和 C 相偏置绕组串 II

[0091] 所述 B 相电枢绕组串、B 相偏置绕组串 I 和 B 相偏置绕组串 II 串联,构成 B 相电枢绕

组；

[0092] 所述C相电枢绕组串、C相偏置绕组串I和C相偏置绕组串II串联，构成C相电枢绕组；

[0093] 另外，所述电枢绕组、偏置绕组I和偏置绕组II的匝数相等；

[0094] 图4是本发明径向磁轴承I的磁通分布图。A、B、C三相电枢绕组产生的磁通如图3所示B和C相电枢绕组在径向磁轴承I部分的连接方式示意图中实线所示（线标号为29），悬浮绕组产生的磁通如图中点虚线所示（线标号为30）。电枢绕组产生的磁通在每个E型结构的中间齿上呈NSNS分布。在气隙1处悬浮绕组和电枢绕组产生磁通方向一样，磁通增加；而在气隙3处，方向相反，磁通减弱，进而产生一个x正方向的悬浮力。在气隙2处悬浮绕组和电枢绕组产生磁通方向一样，磁通增加，而在气隙4处，磁通减弱，进而产生一个y正方向的悬浮力。同理，当悬浮绕组电流反向时，将产生反方向的悬浮力。因此，在给定A、B、C三相电枢绕组电流时，合理控制x、y轴悬浮绕组电流的大小和方向，即可产生大小和方向均可控的悬浮力。

[0095] 电枢绕组电流可采用PWM控制、脉冲控制和角位置控制等，与传统开关磁阻电机的控制方法相同，而悬浮电流采用斩波控制。A、B、C三相电枢绕组电流可由电流传感器实时检测得到，转子径向位移由电涡流传感器实时检测获得，经PI调节得到两个方向悬浮力的给定值。由于悬浮力与A、B、C三相电枢绕组电流和两个方向悬浮绕组电流有关，进而可解算得到两个方向的悬浮电流，作为功率变换器中电流控制的给定值，最终实现电机的四自由度悬浮运行。

[0096] 如图5所示，为本发明四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机控制方法的系统框图。转矩控制可采用PWM控制、脉冲控制和角位置控制等传统开关磁阻电机的控制方法，而悬浮控制则采用电流斩波控制的方式。

[0097] 转矩控制为：检测电机转子位置信息，经计算分别得到实际转速 ω ，将转速误差信号进行PI调节，获得开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ，进而控制电枢绕组功率电路的导通状态，从而实现电机旋转。

[0098] 悬浮控制为：将位移误差信号进行PID调节获得给定悬浮力 $F_{\alpha 1}^*$ 、 $F_{\beta 1}^*$ 、 $F_{\alpha 2}^*$ 、 $F_{\beta 2}^*$ ，再结合实测三相电枢绕组电流 i_{11} 、 i_{12} 和 i_{13} ，即可通过悬浮绕组电流控制器计算出：径向磁轴承I的x方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ，径向磁轴承II的x方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* 。

[0099] 利用电流斩波控制方法，让径向磁轴承I的x轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s1} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* ，让y轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s2} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ；

[0100] 让径向磁轴承II的x轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s3} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* ，让y轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s4} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ，从而实时调节悬浮力，实现电机的四自由度悬浮。

[0101] 如图6所示，为本发明的悬浮绕组电流计算方法框图。图中， k_f 为悬浮力系数，其表达式为：

$$[0102] \quad k_f = \frac{2\mu_0 l r \alpha_s}{9\delta^2} (4 + \sqrt{3}) \quad (1)$$

[0103] 式中, μ_0 为真空磁导率, l 为径向磁轴承的轴向长度, r 为磁轴承转子的半径, α_s 为径向磁轴承E型结构定子的极弧角, δ 为磁轴承部分的单边气隙长度。

[0104] 径向磁轴承I的x和y轴方向悬浮力 $F_{\alpha 1}^*$ 和 $F_{\beta 1}^*$ 的表达式为:

$$[0105] \quad F_{\alpha 1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s1}^* \quad (2)$$

$$[0106] \quad F_{\beta 1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s2}^* \quad (3)$$

[0107] 式中, i_1 、 i_2 、 i_3 分别为A、B、C三相电枢绕组的电流, i_{s1}^* 、 i_{s2}^* 分别为径向磁轴承I的x、y轴方向悬浮绕组电流, N_b 为电枢绕组的匝数, 且两种偏置绕组匝数与电枢绕组相等, N_s 为径向悬浮绕组的匝数。

[0108] 径向磁轴承II的x和y轴方向悬浮力 $F_{\alpha 2}^*$ 和 $F_{\beta 2}^*$ 的表达式为:

$$[0109] \quad F_{\alpha 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s3}^* \quad (4)$$

$$[0110] \quad F_{\beta 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s4}^* \quad (5)$$

[0111] 式中, i_{s3}^* 、 i_{s4}^* 分别为径向磁轴承II的x、y轴方向悬浮绕组电流。

[0112] 由表达式(2)~(5)可知, 本发明四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机的径向、轴向悬浮力与转子位置角 θ 无关, 仅与电机结构参数、三相电枢绕组电流和四个悬浮绕组电流有关。其中, 四个径向悬浮力仅与该方向径向悬浮电流和三相电枢绕组电流有关, 各径向悬浮力间自然解耦; 又因为四个悬浮力均与转子位置角无关, 因此转矩和悬浮力间又可解耦控制, 另外, 只要各相电枢电流对称, 即可保证各相电枢绕组单独励磁时, 输出的悬浮力均衡对称。从而解决了现有复合结构无轴承开关磁阻电机的径向悬浮力间的耦合问题, 以及悬浮力输出不均衡问题。

[0113] 需要指出的是, 由于悬浮力正负随悬浮绕组电流的正负变化而变化, 因此四个悬浮绕组电流方向在控制时会发生变化, 需采用可调电流方向的功率变换器。

[0114] 本发明磁悬浮电机的控制方法, 所述四自由度复合结构无轴承开关磁阻电机包括一个开关磁阻磁阻电机和两个径向磁轴承, 其中开关磁阻电机产生旋转转矩, 两个径向磁轴承产生4个径向悬浮力, 以实现转子四个方向的悬浮运行; 所述电机绕组由三相电枢绕组和四个径向悬浮绕组构成, 其中独立控制三相电枢绕组电流, 以调节转矩, 并产生偏置磁通; 独立控制四个悬浮绕组电流, 实现四自由度悬浮调节; 包括如下步骤:

[0115] 步骤A, 获取开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ; 具体步骤如下:

[0116] 步骤A-1, 采集磁阻电机转子实时转速, 得到转子角速度 ω ;

[0117] 步骤A-2, 将磁阻电机转子角速度 ω 与设定的参考角速度 ω^* 相减, 得到转速差 $\Delta\omega$;

[0118] 步骤A-3, 所述转速差 $\Delta\omega$, 通过比例积分控制器, 获得开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} ;

[0119] 步骤B, 获取径向磁轴承I的x轴和y轴方向给定悬浮力; 其具体步骤如下:

[0120] 步骤B-1, 获取磁轴承转子I的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_1 和 β_1 , 其中, x轴为水平方向, y轴为竖直方向;

[0121] 步骤B-2,将实时位移信号 α_1 和 β_1 分别与给定的参考位移信号 α_1^* 和 β_1^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\beta_1$ 经过比例积分微分控制器,得到径向磁轴承I的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha 1}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta 1}^*$;

[0122] 步骤C,获取径向磁轴承II的x轴和y轴方向给定悬浮力;其具体步骤如下:

[0123] 步骤C-1,获取磁轴承转子II的x轴和y轴方向的实时位移信号 α_2 和 β_2 ;

[0124] 步骤C-2,将实时位移信号 α_2 和 β_2 分别与给定的参考位移信号 α_2^* 和 β_2^* 相减,分别得到x轴方向和y轴方向的实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$,将所述实时位移信号差 $\Delta\alpha_2$ 和 $\Delta\beta_2$ 经过比例积分微分控制器,得到径向磁轴承II的x轴方向悬浮力 $F_{\alpha 2}^*$ 和y轴方向悬浮力 $F_{\beta 2}^*$;

[0125] 步骤D,调节悬浮力,具体步骤如下:

[0126] 步骤D-1,采集3相实时的电枢绕组电流,根据所述悬浮力 $F_{\alpha 1}^*$ 和 $F_{\beta 1}^*$,以及计算公式 $F_{\alpha 1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s1}^*$ 和 $F_{\beta 1}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s2}^*$,解算得到径向磁轴承I的x方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;其中, k_f 为悬浮力系数, $k_{f1} = \frac{2\mu_0 l r \alpha_s}{9\delta^2} (4 + \sqrt{3})$, μ_0 为真空磁导率, l 为径向磁轴承的轴向长度, r 为磁轴承转子的半径, α_s 为径向磁轴承E型结构定子的极弧角, δ 为径向磁轴承的单边气隙长度, N_b 、 N_s 分别电枢绕组和径向悬浮绕组的匝数, i_1 、 i_2 和 i_3 分别为三相电枢绕组电流;

[0127] 步骤D-2,根据所述悬浮力 $F_{\alpha 2}^*$ 和 $F_{\beta 2}^*$,以及计算公式 $F_{\alpha 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s3}^*$ 和 $F_{\beta 2}^* = k_f N_b N_s (i_1 + i_2 + i_3) i_{s4}^*$,解算得到径向磁轴承II的x方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* 和y轴方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

[0128] 步骤D-3,利用电流斩波控制方法,用径向磁轴承I的x轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s1} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s1}^* ,用y轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s2} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s2}^* ;

[0129] 用径向磁轴承II的x轴方向悬浮绕组实际电流 i_{s3} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s3}^* ,用y轴方向悬浮绕组的实际电流 i_{s4} 跟踪该方向悬浮绕组电流参考值 i_{s4}^* ;

[0130] 步骤E,调节转矩;通过调节开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 的取值,从而实时调节转矩。

[0131] 综上所述,本发明在结构上实现了转矩和悬浮力的解耦,以及径向悬浮力间的解耦,并解决了现有电机的悬浮力输出不均衡问题。

[0132] 对该技术领域的普通技术人员而言,根据以上实施类型可以很容易联想其他的优点和变形。因此,本发明并不局限于上述具体实例,其仅仅作为例子对本发明的一种形态进行详细、示范性的说明。在不背离本发明宗旨的范围内,本领域普通技术人员根据上述具体实例通过各种等同替换所得到的技术方案,均应包含在本发明的权利要求范围及其等同范围之内。

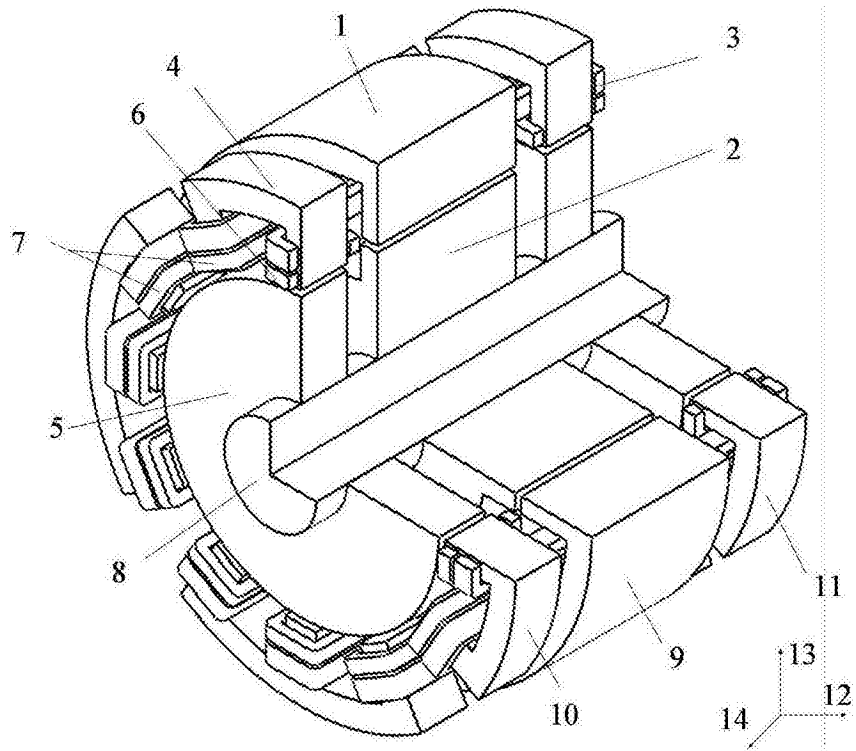


图1

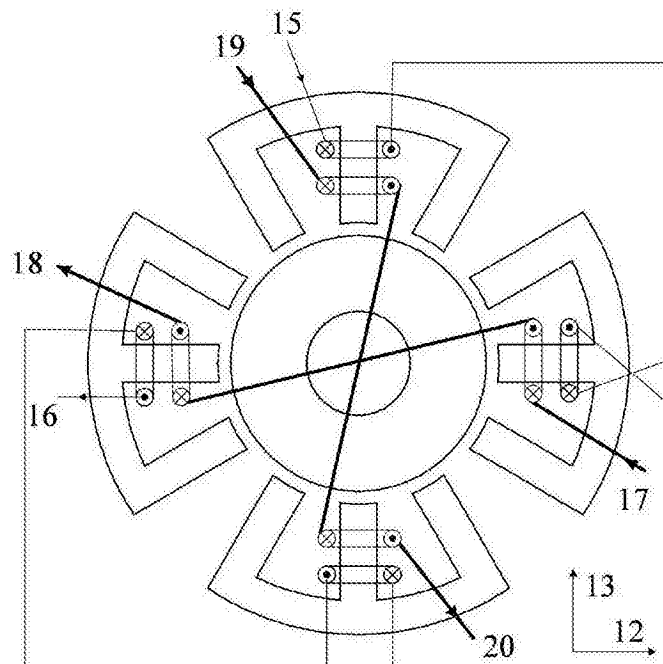


图2

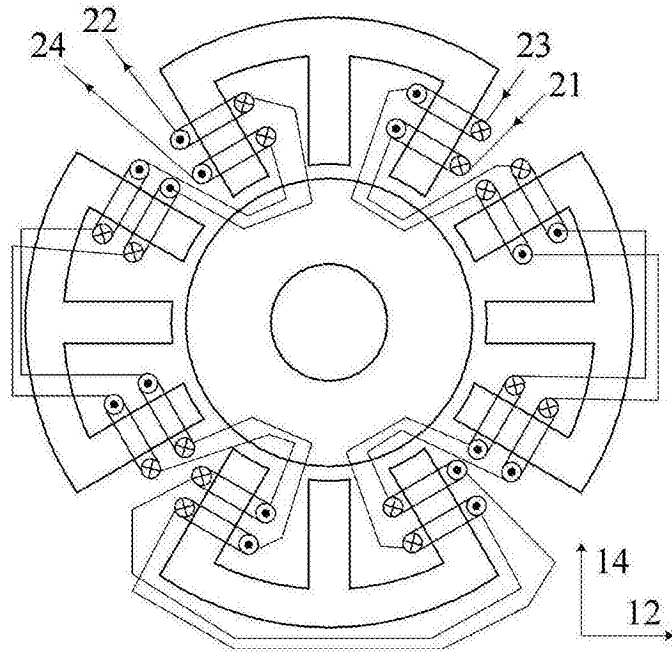


图3

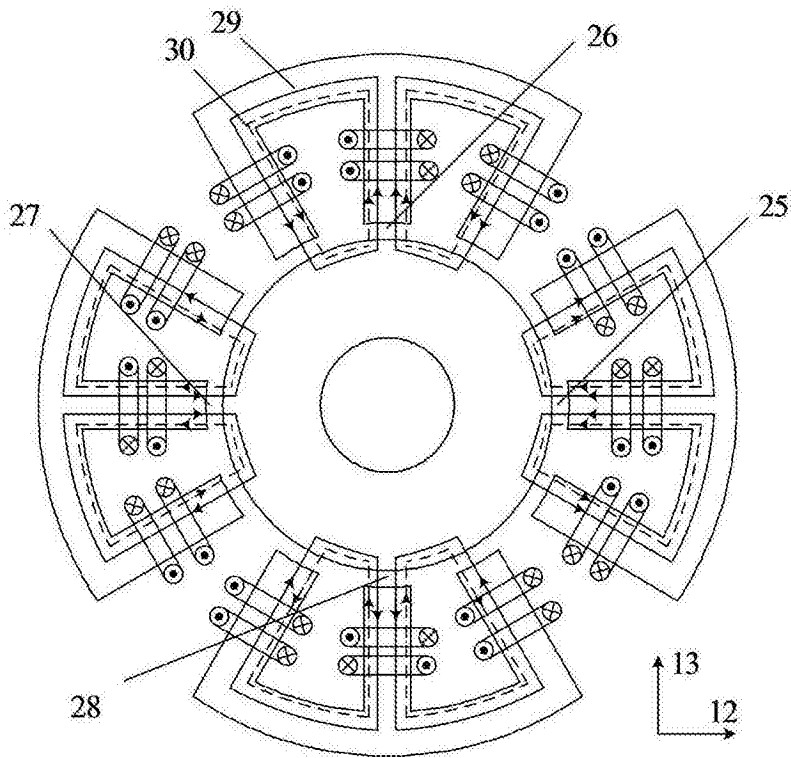


图4

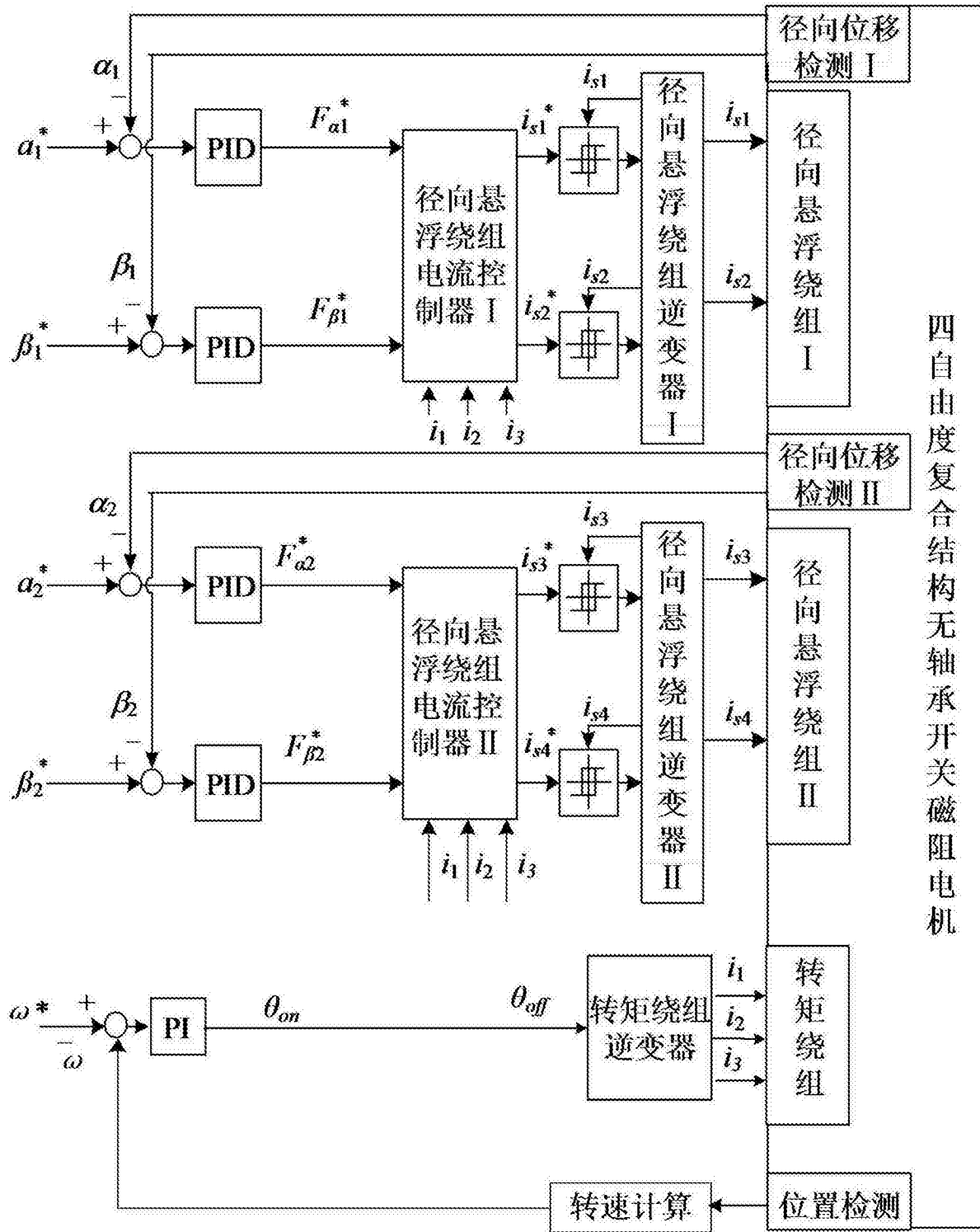


图5

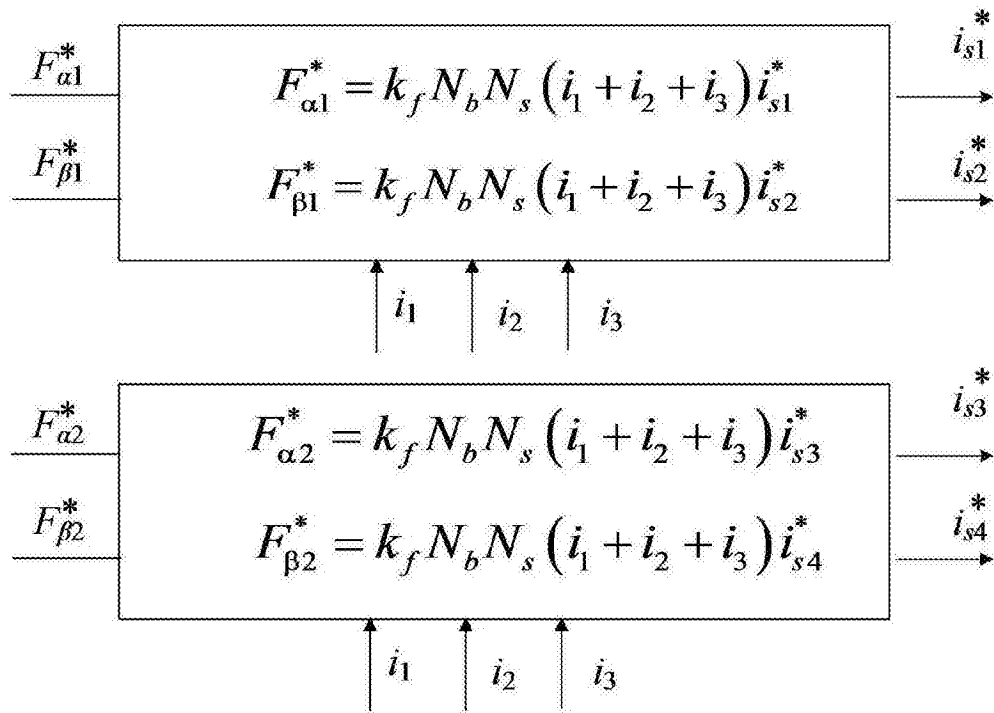


图6