

一种磁对准系统及其对准方法

技术领域

本发明涉及一种动线圈式磁浮平面电机磁对准系统及其对准方法。

背景技术

动线圈式磁浮平面电机的基本控制原理类似普通直线电机，即根据线圈在磁场中的位置，改变通入三相线圈的电流角度，使得电机在所需方向上的出力恒定。由于采用 ID、IQ 解耦的矢量控制方式，因此初始磁对准角度的精确与否，除了保证在动线圈式磁浮平面电机水平向、垂向出力最大外，还影响到电机水平向与垂向的解耦。若磁对准角度不够精确、水平向与垂向解耦不够彻底，则会在控制上引入水平向与垂向的串扰，影响电机的伺服性能。

US7205741B2 公开了一种现有的检测初始磁对准角度的系统，如图 1 所示，该方案提出：在电机线圈 1 与磁钢 2 表面之间铺设一层可压缩材料制成的敏感元件 3，配以电容或电感距离传感器 4，检测电机在垂向出力时使敏感元件 3 压缩形变量。通过在磁对准范围内更改三相线圈电流角度并判断敏感元件 3 的形变量大小，从而搜寻出电机的初始磁对准角度。

上述磁对准角度系统的精确程度依赖于电机垂向出力时敏感元件 3 的形变量和距离传感器 4 的分辨率，这需要电机垂向出力与敏感元件 3 形变量之间有良好的线性关系，当垂向出力过大或过小时，这种线性关系将难以满足，从而会影响所测得的磁对准角度的精度。

发明内容

本发明提供一种动线圈式磁浮平面电机磁对准系统及其对准方法，以提高磁对准精度。

为解决上述技术问题，本发明提供一种磁对准系统，包括：磁钢阵列，

用于产生一磁场；电机定子，设置于所述磁钢阵列上方，所述电机定子包括四个呈矩阵排布的线圈组，每两个相邻的线圈组中的一个沿第一方向排列，另一个沿垂直于第一方向的第二方向排列；固定工装，关于所述磁钢阵列具有一固定的相对位置，且所述固定工装与所述电机定子及磁钢阵列均不接触；以及至少一个力传感器单元，连接于电机定子与所述固定工装之间，所述力传感器用于当所述电机定子的某一个线圈组中通入一三相电流时，测量该线圈组在所述磁场的作用下产生的出力值。

较佳地，每个线圈组包括多个平行设置的三相线圈。

较佳地，所述磁钢阵列包括多个磁体以矩阵方式沿第三和第四方向排布，其中，所述第三方向和第四方向垂直，且第三方向与所述第一方向成45度夹角，第四方向与所述第二方向成45度夹角。

较佳地，每个线圈组中的两个相邻的三相线圈之间的距离为 $4\tau/3$ ，其中， τ 为磁钢阵列中两个相邻磁体之间的磁极距。

较佳地，所述力传感器单元包括一个三维以上的力传感器，或者包括三个一维力传感器。

本发明还提供了一种磁对准方法，应用于上述磁对准系统中，所述方法包括：

安装固定工装及力传感器单元，对所述四个线圈组中的每一个执行以下步骤以完成初始磁对准：

在一个磁对准角度周期内变换通入线圈组的三相电流的角度，通过力传感器单元测量所述线圈组的水平向或垂向出力值；

根据对应所述线圈组水平向或垂向出力值最大的三相电流角度确定所述线圈组的磁对准角度。

较佳地，所述方法还包括：

拆除固定工装及力传感器，对所述四个线圈组中的每一个执行以下步骤以伺服修正磁对准角度：

使一个线圈组脱离闭环控制，由其余三个线圈组在一控制器的控制下构成闭环控制，记录此时控制器的输出作为初始偏置；

给该一个线圈组通入三相电流，并变换所述三相电流的角度，记录此时控制器的输出作为实际输出；

将该一个线圈组的三相电流角度调整到使控制器实际输出与初始偏置最接近。

较佳地，变换所述三相电流的角度是在初始磁对准角度的基础上，在 $-1/N$ 个磁对准角度周期到 $+1/N$ 个磁对准角度周期的范围内变换，其中 N 为自然数。

与现有技术相比，本发明具有以下优点：

1. 本发明采用力传感器，相比现有技术中采用的可压缩材料，其具有更可信的线性工作区间，减少了非线性因素对磁对准的影响；

2. 现有技术中的可压缩材料只能测量电机的垂向出力，本发明的力传感器可以测量电机的垂向出力，也可以测量其水平向出力；

3. 所述电机定子通过力传感器固定于固定工装上，可以避免电机因水平向出力大于电机定子与磁钢阵列表面的静摩擦力而产生位置偏移；

4. 采用伺服修正磁对准角度的方法可以在无需多余传感器的情况下提高磁对准精度，避免传感器分辨率对磁对准精度的影响。

附图说明

图 1 为现有技术中的动线圈式磁浮平面电机磁对准系统的结构示意图；

图 2 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机磁对准系统的俯视结构示意图；

图 3 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机磁对准系统的侧视图；

图 4 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机出力示意图；

图 5 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机磁对准方法流程

图；

图 6 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机控制结构框图；

图 7 为本发明一具体实施方式的动线圈式磁浮平面电机三组线圈构成闭环控制的控制结构框图；

图 8 为本发明一具体实施方式的伺服修正磁对准角度方法流程图。

具体实施方式

为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂，下面结合附图对本发明的具体实施方式做详细的说明。需说明的是，本发明附图均采用简化的形式且均使用非精准的比例，仅用以方便、明晰地辅助说明本发明实施例的目的。

本发明提供的动线圈式磁浮平面电机磁对准系统，如图 2 至图 4 所示，包括磁钢阵列 10、电机动子 20、固定工装 30 以及力传感器 40，具体地，所述磁钢阵列 10 为二维磁钢阵列，由多个磁体以二维阵列方式排布在 $X'-Y'$ 平面内而构成，每个磁体沿垂直于 $X'-Y'$ 平面的方向放置，且相邻磁体的磁极相反，即对于一个 N 极朝上放置的磁体而言，其相邻的磁体为 S 极朝上放置。磁钢阵列 N 极到 S 极的磁极距由 τ 表示，该磁钢阵列 10 在其周围区域形成磁场。所述电机动子 20 置于磁钢阵列 10 上方，包括四个呈矩阵排布的线圈组 X1、X2、Y1、Y2，其中每两个相邻的线圈组中的一个沿第一方向（X 方向）排列，另一个沿垂直于第一方向的第二方向（Y 方向）排列，优选的，X 与 X' 方向、Y 与 Y' 方向分别互成 45 度夹角，使得所述磁钢阵列 10 的磁密分布沿 X 和 Y 方向均呈正弦分布。所述电机动子 20 的每个线圈组即为一个发力体，具体的，每个线圈组包括若干平行设置的三相线圈 21，本实施例中，每个线圈组包括三个三相线圈 21，当三相线圈 21 通入电流后，磁钢阵列 10 的磁场将对三相线圈 21 产生作用力，并驱使电机动子 20 移动。

为了检测每个线圈组的初始磁对准角度，需要在线圈组中通入三相电流

的情况下,将电机动子 20 保持在原处,并准确测量出此时磁场对线圈组在 X、Y、Z 方向上分别产生的作用力。为此,将电机动子 20 通过能够分别测量 X、Y、Z 三个轴向的力的力传感器 40 连接至与所述磁钢阵列 10 相对位置保持不变的固定工装 30 上。在一实施例中,如图 3 所示,所述固定工装 30 采用框架式结构,跨设在磁钢阵列 10 的外侧,具体的,所述磁钢阵列 10 和固定工装 30 均设置在基底 50 上,固定工装 30 具有足够的宽度和高度,以将磁钢阵列 10 连同其上方的电机动子 20 一起容纳于固定工装 30 所围成的空间内,且固定工装 30 不接触磁钢阵列 10 及电机动子 20,从而不会对磁钢阵列 10 及电机动子 20 的正常工作产生干扰。所述力传感器 40 是一个三维力传感器,即通过该一个力传感器 40 即可实现 X、Y、Z 三个轴向的力的测量,在其它实施例中,也可采用三个一维力传感器进行组合测量,或者采用一个三维以上的力传感器进行直接测量。所述力传感器 40 分别连接电机动子 20 和固定工装 30,一方面可使电机动子 20 相对于固定工装 30,进而相对于磁钢阵列 10 的位置保持不变,另一方面可以实时测量出电机动子 20 在三维方向上的出力。

请重点参考图 4,线圈组 X1 产生水平向力 $F_{x_{x1}}$ 和垂向力 $F_{z_{x1}}$ 、线圈组 X2 产生水平向力 $F_{x_{x2}}$ 和垂向力 $F_{z_{x2}}$ 、线圈组 Y1 产生水平向力 $F_{y_{y1}}$ 和垂向力 $F_{z_{y1}}$ 、线圈组 Y2 产生水平向力 $F_{y_{y2}}$ 和垂向力 $F_{z_{y2}}$, 较佳地,每个线圈组中的两个相邻的三相线圈 21 之间的距离为 $4\tau/3$, 其中, τ 为磁钢阵列 N 极到 S 极的磁极距。如前所述,当磁钢阵列 10 中磁铁的排布方向与电机动子 20 中线圈组的排布方向呈 45 度夹角时,所述磁钢阵列 10 的磁密分布沿 X/Y 方向呈正弦分布,故各发力体三相线圈 21 处的磁密分布 k_j 的表达式为:

$$K_j = \hat{K} \sin\left(\frac{\pi[p + 4(j-1)\tau/3]}{\tau}\right), \quad j=1,2,3 \quad (1)$$

设定驱动器输出三相电流为:

$$I_j = \hat{I} \sin\left(\frac{\pi[p + 4(j-1)\tau/3]}{\tau} + \varphi\right), \quad j=1,2,3 \quad (2)$$

其中, $\hat{k}$ 为磁密幅值, $\hat{i}$ 为三相电流幅值, P 为电机动子运动行程, 与电机动子 20 的运动有关, φ 为电机动子 20 的三相线圈 21 中电流角度与实际线圈所在磁场位置磁角度的差值, 则单个发力体的出力 F 为:

$$F = \frac{3}{2} \hat{K} \hat{I} \cos(\varphi) \quad (3)$$

由于在固定工装 30 及力传感器 40 的作用下每个发力体相对于磁钢阵列 10 的位置不变, 因而其对应的磁角度也不变, 此外, 对于给定的磁钢阵列 10 和电机动子 20, 其对应的磁密幅值 $\hat{k}$ 和三相电流幅值 $\hat{i}$ 也是不变的, 在这样的条件下, 上述公式 (3) 中的 F 大小将只与三相线圈 21 中的电流角度有关。因此, 采用本发明的磁对准系统来检测某一发力体的初始磁对准角度时, 只需在 $[-\tau, \tau]$ 周期内, 通过改变该发力体的三相线圈 21 中的电流角度, 利用力传感器 40 寻找使该发力体出力 F 最大的电流角度, 即可获得对应的 φ 值作为该发力体的初始磁对准角度, 其具体过程将在下文加以详述。

本发明还提供了一种动线圈式磁浮平面电机磁对准方法, 采用上述的动线圈式磁浮平面电机磁对准系统实现, 如图 5 所示, 并结合图 2 至图 4, 其步骤包括:

选择一个线圈组;

在三相电流的可变角度范围 (相当于一个磁对准角度周期) 内变换通入该线圈组的三相电流的角度, 具体地, 将磁对准角度周期平均分为 N 份, 以 $1/N$ 磁对准角度周期为单位依次改变三相电流的角度, 并且每改变一次三相电流的角度值, 就通过力传感器 40 测量所述线圈组在水平方向上的相应出力值, 对于线圈组 X1、X2 而言, 测量的是 X 向力, 对于线圈组 Y1、Y2 而言, 测量的是 Y 向力;

根据对应所述线圈组在水平方向上出力值最大的三相电流角度, 确定所述线圈组的磁对准角度;

所述线圈组初始磁对准结束。

四个发力体中的每一个均需经过上述初始磁对准步骤。

需要说明的是, 虽然上述实施例中力传感器 40 测量的是水平向力 (X 向或 Y 向力), 但也可以改为测量垂向力 (Z 向力), 因为无论是垂向力还是水平向力都满足电机动子 20 相对磁钢阵列 10 位置固定时, 出力随 φ 变化呈正弦变化的关系。因此对于测量垂向力的情况, 只需根据对应所述线圈组在垂向上出力值最大的三相电流角度即可确定所述线圈组的磁对准角度。

当按照上述步骤完成初始磁对准, 所述动线圈式磁浮平面电机即已实现了电机水平向出力与垂向出力的初步解耦, 此时可以移除固定工装 30 及力传感器 40, 使电机动子 20 能够相对磁钢阵列 10 进行移动, 并可根据所测得的初始磁对准角度对电机实现伺服闭环控制。在闭环状态下, 通过监视代表电机出力大小的控制量, 可以进一步提高磁对准精度。

具体地, 动线圈式磁浮平面电机六自由度解耦控制策略的框图如图 6 所示, 包括: 四个发力体, 即四个线圈组 X1、X2、Y1、Y2; 六个控制器, 即 X 控制器、RX 控制器、Y 控制器、RY 控制器、Z 控制器、RZ 控制器, 分别对应六个逻辑轴 X、Rx、Y、Ry、Z、Rz, 且用于分别控制相应的逻辑轴输出; 以及执行器系统, 用于从六个控制器接收逻辑轴输出 F_X 、 F_Y 、 F_Z 、 T_{rx} 、 T_{ry} 、 T_{rz} 并将其转换为八个物理轴 x1、z1、x2、z2、y1、z3、y2、z4 进行输出 F_{x1}^* 、 F_{z1}^* 、 F_{x2}^* 、 F_{z2}^* 、 F_{y1}^* 、 F_{z3}^* 、 F_{y2}^* 、 F_{z4}^* , 具体的过程为: 读取位置误差, 包括 x_error、y_error、z_error、rx_error、ry_error、rz_error, 分别对应 x、y、z 向平移误差及 rx、ry、rz 向旋转误差, 以 x_error 为例, 该误差经相对应的 X 控制器, 转换为相对的逻辑轴输出力 F_X , 经执行器系统进行力的再分配, 将逻辑轴上的力转换为物理轴上的力 F_{x1}^* , 并结合磁角度 φ^1 控制驱动器 1 输出电流 i_{abc1} , 所述输出电流 i_{abc1} 通入线圈组 X1 中, 控制所述线圈组 X1 发力。

较佳地, 本发明的动线圈式磁浮平面电机磁对准方法还包括一种伺服修正磁对准角度方法, 以进一步提高磁对准精度, 所述平面电机的各线圈组 X1、

X2、Y1、Y2 在一伺服系统中进行闭环控制，所述伺服系统中的控制器对应控制所述平面电机在各运动方向上的出力，如图 8 所示，其步骤包括：

选择一个线圈组作为目标线圈组进行磁对准角度伺服修正，使所述目标线圈组脱离闭环控制，由其余三个线圈组构成闭环控制，记录此时控制器的输出作为初始偏置，也就是说，对其中一个线圈组，例如线圈组 X1，的磁角度进行伺服修正时，该线圈组 X1 不参与伺服控制，其余三个线圈组，即线圈组 X2、Y1、Y2 构成闭环控制。由于三个发力体也是可以完成电机六自由度控制的，如图 7 所示，驱动器 1 脱离闭环控制，动线圈式磁浮平面电机六自由度解耦控制策略的框图，包括电机三个发力体（即三个线圈组 X2、Y1、Y2）、六个逻辑轴（X、Rx、Y、Ry、Z、Rz）及六个物理轴（x2、z2、y1、z3、y2、z4）的控制。此时线圈组 X1 即可用于对该发力体磁对准角度的进一步修正，而另三个发力体控制电机处于伺服悬浮状态；

给所述目标线圈组通入三相电流，该线圈组在由其余三个线圈组构成的伺服系统作用下保持在原处，变换该目标线圈组中的三相电流的角度，记录此时控制器的输出作为实际输出，较佳地，对其中一个线圈组的磁对准角度进行伺服修正时，给所述目标线圈组通入的三相电流角度是在初始磁对准角度的基础上，在 $-1/N$ 个磁对准角度周期到 $+1/N$ 个磁对准角度周期的范围内变换；

以图 7 所示的驱动器 1 脱离闭环控制为例，当另三个发力体控制电机处于伺服悬浮状态时，该线圈组 X1 通入电流产生开环垂向力，若产生水平向分力则继续进行磁对准角度调整。也就是说，X 控制器的输出 F_x 应为一固定偏置值 F_{x_offset} （理论上 $F_{x_offset} = 0$ ，但由于初始磁对准时对准精度的限制，提供电机悬浮的垂向出力会耦合进水平方向）。此时给未处于闭环控制中的发力体设置垂向电流 i_d ，电机在伺服作用下会保持在原处，记录此时的 X 控制器的输出 F_x ，若 F_x 不等于初始时的固定偏置值 F_{x_offset} ，则说明该未处于闭环控制中的

发力体的垂向力耦合进了水平方向，即其磁对准精度还可以提高，故需对磁角度继续进行调整，较佳地，根据读取所述闭环控制中的控制量，确定进行伺服修正的线圈组 X1 产生的水平向分力，进而确定磁角度调整的范围。

将对应目标线圈组的三相电流角度调整到控制器实际输出与初始偏置最接近的位置；

具体地，通过调整该发力体的磁对准角度 φ^1 ，使观察到的 F_x 与初始时的固定偏置值 $F_{x_{offset}}$ 最为接近。

伺服修正磁对准角度完成。

需要说明的是，每个发力体均可通过上述的伺服修正磁对准角度方法来提高磁对准精度。

显然，本领域的技术人员可以对发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样，倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内，则本发明也意图包括这些改动和变型在内。

权利要求

1. 一种磁对准系统，包括：
磁钢阵列，用于产生一磁场；
电机动子，设置于所述磁钢阵列上方，所述电机动子包括四个呈矩阵排布的线圈组，每两个相邻的线圈组中的一个沿第一方向排列，另一个沿垂直于第一方向的第二方向排列；
固定工装，关于所述磁钢阵列具有一固定的相对位置；以及
力传感器单元，连接于电机动子与所述固定工装之间，所述力传感器用于当所述电机动子的某一个线圈组中通入一三相电流时，测量该线圈组在所述磁场的作用下产生的出力值。
2. 如权利要求 1 所述的磁对准系统，其特征在于，每个线圈组包括多个平行设置的三相线圈。
3. 如权利要求 2 所述的磁对准系统，其特征在于，所述磁钢阵列包括多个磁体以矩阵方式沿第三和第四方向排布，其中，所述第三方向和第四方向垂直，且第三方向与所述第一方向成 45 度夹角，第四方向与所述第二方向成 45 度夹角。
4. 如权利要求 3 所述的磁对准系统，其特征在于，每个线圈组中的两个相邻的三相线圈之间的距离为 $4\tau/3$ ，其中， τ 为磁钢阵列中两个相邻磁体之间的磁极距。
5. 如权利要求 1 所述的磁对准系统，其特征在于，所述力传感器单元包括一个三维以上的力传感器。
6. 如权利要求 1 所述的磁对准系统，其特征在于，所述力传感器单元包括三个一维力传感器。
7. 如权利要求 1 所述的磁对准系统，其特征在于，所述固定工装与所述电机动子及磁钢阵列均不接触。

8. 一种磁对准方法，应用于如权利要求 1~7 中任一项所述的磁对准系统中，其特征在于，包括：

安装固定工装及力传感器单元，对所述四个线圈组中的每一个执行以下步骤以完成初始磁对准：

在一个磁对准角度周期内变换通入线圈组的三相电流的角度，通过力传感器单元测量所述线圈组的水平向或垂向出力值；

根据对应所述线圈组水平向或垂向出力值最大的三相电流角度确定所述线圈组的磁对准角度。

9. 如权利要求 8 所述的磁对准方法，其特征在于，还包括：

拆除固定工装及力传感器，对所述四个线圈组中的每一个执行以下步骤以伺服修正磁对准角度：

使一个线圈组脱离闭环控制，由其余三个线圈组在一控制器的控制下构成闭环控制，记录此时控制器的输出作为初始偏置；

给该一个线圈组通入三相电流，并变换所述三相电流的角度，记录此时控制器的输出作为实际输出；

将该一个线圈组的三相电流角度调整到使控制器实际输出与初始偏置最接近。

10. 如权利要求 9 所述的磁对准方法，其特征在于，变换所述三相电流的角度是在初始磁对准角度的基础上，在 $-1/N$ 个磁对准角度周期到 $+1/N$ 个磁对准角度周期的范围内变换，其中 N 为自然数。