(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101392795 B
(45)授权公告日 2010.08.25

(21)申请号 200810155044.6

(22)申请日 2008.10.24

(73)专利权人 江苏大学
地址 212013 江苏省镇江市学府路 301 号

(72)发明人 邬清海 朱焜秋

(74)专利代理机构 南京知识律师事务所 32207
代理人 汪旭东

(51)Int.Cl.
F16C 32/04(2006.01)

审查员 陈静文

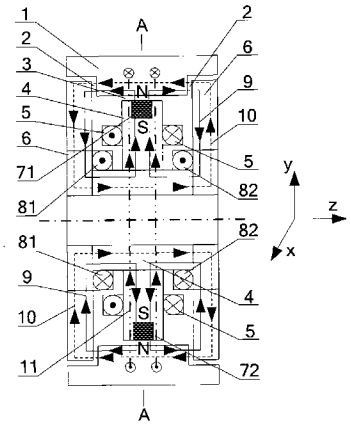
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 2 页

(54)发明名称

一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承

(57)摘要

一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承，其轴向定子采用双片式六极结构，每片由 3 个沿圆周均匀分布的轴向定子磁极组成；带有沿圆周均匀分布的 3 个磁极的径向定子处于 2 片轴向定子中间；3 块永磁体均为块状圆环形且径向充磁，镶嵌在径向定子磁极外侧的圆环形凹槽中，同时提供径向和轴向偏磁磁通；轴向定子与转子之间构成轴向气隙，径向定子与转子之间构成径向气隙；轴向控制线圈紧挨轴向定子，置于内侧，采用直流线性功放提供轴向控制电流；3 个径向控制线圈绕在 3 个径向定子磁极上，采用三相交流功率逆变器进行驱动控制。本发明大大减小了磁轴承的体积，显著降低了功耗，适用于需要悬浮支撑的电主轴及旋转主轴系统。



CN 101392795 B

1. 一种外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，包括转子(1)、径向定子(4)、轴向定子(6)、永磁体(71、72、73)、径向控制线圈(51、52、53)、轴向控制线圈(81、82)，其特征在于，轴向定子(6)采用2片×3极的双片式六极结构，左右两侧每片由3个沿圆周均匀分布的轴向定子磁极(61、62、63)组成；带有沿圆周均匀分布的3个径向定子磁极(41、42、43)的径向定子(4)处于2片轴向定子(6)中间；轴向控制线圈(81、82)紧挨轴向定子(6)，置于内侧；3个径向控制线圈(51、52、53)绕在3个径向定子磁极(41、42、43)上；轴向定子(6)与转子(1)表面之间的气隙构成轴向气隙(2)，3个径向定子磁极(41、42、43)与转子(1)表面之间的气隙构成径向气隙(3)。

2. 根据权利要求1所述的外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，其特征在于，所述3块永磁体(71、72、73)的形状大小完全相同，为块状圆环形，镶嵌在3个径向定子磁极(41、42、43)外侧的圆环形凹槽中，同时提供径向和轴向偏磁磁通(9)。

3. 根据权利要求1所述的外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，其特征在于，所述转子(1)由圆环形硅钢片叠压而成。

4. 根据权利要求1所述的外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，其特征在于，所述径向定子(4)和轴向定子(6)均采用硅钢片叠压而成。

5. 根据权利要求1所述的外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，其特征在于，轴向控制线圈(81、82)采用直流线性功率放大器提供控制电流；径向控制线圈(51、52、53)采用三相交流功率逆变器进行驱动控制。

6. 根据权利要求2所述的外转子径向-轴向三自由度混合磁轴承，其特征在于，所述的3块形状大小完全相同的块状圆环形永磁体(71、72、73)均采用稀土材料钕铁硼制成且径向充磁。

一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承

技术领域

[0001] 本发明属于机电传动设备技术领域，是一种没有任何机械接触的磁轴承领域，特指一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承，适用于各类旋转机械的三自由度悬浮支承，可作为五自由度磁悬浮高速机床电主轴系统等机械设备中旋转部件的无接触悬浮支承。

背景技术

[0002] 随着二十世纪七十年代磁轴承技术的迅速发展，国内外对磁轴承的研究主要集中于采用直流信号同时提供静态偏磁磁通与控制磁通的主动型磁轴承，并着重研究主动型轴向单自由度和径向二自由度磁轴承。任何一个稳定的旋转系统转子均需要在其五自由度上施加约束，故通常均是采用 1 个轴向单自由度磁轴承和 2 个二自由度径向磁轴承来构成五自由度悬浮支承系统。一方面，径向二自由度磁轴承及轴向单自由度磁轴承均要占用较大的轴向空间，导致磁轴承支承的电机主轴轴向长度较长，体积较大；同时转子临界转速下降，电机或各类旋转主轴向更高转速和功率发展受到限制；另一方面，采用直流控制，直流功率放大器价格高，体积大，1 个径向磁轴承通常需要 4 路单极性（或 2 路双极性）功率放大电路，从而直接导致了磁轴承体积大，成本高，大大限制了其应用领域，特别是在航空航天及军事应用领域。

[0003] 因此，研究人员开始致力于对以上两个方面进行改进优化。在 2000 年第七届国际磁轴承会议上，瑞士苏黎士联邦工学院 (ETH) 的 Redemann.C 发表了关于 30kW 无轴承密封泵应用测试报告，研究了二自由度的三相交流混合磁轴承，该磁轴承直接采用工业上通用的三相逆变器提供控制电流，并采用永磁体提供静态偏磁磁场，大大减小了其功率放大器体积、降低了损耗，但还是要与一轴向主动磁轴承才能实现三自由度的悬浮支承，依然没能在整体系统轴向结构紧凑方面、转子临界转速提高及磁轴承承载力提高方面取得进步。

[0004] 国内现有的相关专利申请情况检索有：(1) 一种永磁偏磁轴向混合磁轴承（专利公开号：CN101025198）；(2) 永磁偏置轴向径向磁轴承（专利公开号：CN101149077A）；(3) 三磁极的永磁偏置径向磁轴承（专利公开号：CN101158374A）；(4) 三自由度交流混合磁轴承（专利公开号：CN101038011）。

[0005] 上述专利 1 所提出的轴向磁轴承采用的轴向定子为圆盘形结构，磁轴承重量大、磁轴承散热性能差。专利 2 也是三自由度混合磁轴承，但其采用的是 2 个三磁极的径向定子结构，同时需要 6 个径向控制线圈和 2 个环形永磁体，转子具有大的圆盘结构，磁轴承的体积大，磁轴承的功耗高。专利 3 提出的三磁极的永磁偏置径向磁轴承采用的是内转子和环形永磁体的结构，属于同极型磁轴承，磁轴承轴向尺寸大。专利 4 提出的三自由度交流混合磁轴承也属于同极型磁轴承，其采用了薄片状的轴向定子，磁轴承的承载力小，磁轴承的稳定性差。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于克服现有技术的缺陷提供一种结构合理紧凑、轴向长度小、承载力大、功耗低、稳定性好和效率高、同时控制径向－轴向三自由度的交直流混合磁轴承。

[0007] 本发明的目的还在于，进一步减小永磁外转子混合磁轴承的电主轴或各种需要悬浮支承旋转主轴的轴向尺寸，以使得系统的临界转速得到进一步提高，并显著降低功率放大电路的功率损耗、大大减小磁轴承系统的体积与成本，使得此类磁轴承能在超高速超精密数控机床、磁悬浮无轴承电机、飞轮储能系统及人造卫星等悬浮支承系统中得到广泛应用。

[0008] 实现本发明目的的技术方案为：一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承，包括转子、径向定子、具有 2 片 ×3 极的双片式六极结构的轴向定子、3 个径向控制线圈、2 个轴向控制线圈和 3 块永磁体；左右两侧每片轴向定子由 3 个沿圆周均匀分布的磁极组成；带有沿圆周均匀分布的 3 个磁极的径向定子处于 2 片轴向定子中间；轴向控制线圈紧挨轴向定子，置于内侧；3 个径向控制线圈绕在 3 个径向定子磁极上；轴向定子与转子表面之间的气隙构成轴向气隙，3 个径向定子磁极与转子表面之间的气隙构成径向气隙。

[0009] 上述技术方案中采用双片式六极结构的轴向定子结构，减轻了磁轴承重量、提高了磁轴承散热性能，且轴向控制磁通不经过径向气隙，提高了磁轴承工作效率。径向定子采用三极结构，转子无大圆盘结构，提高了转子的临界转速，增强系统的稳定性。

[0010] 所述转子由圆环形硅钢片叠压而成，轴向定子和径向定子均采用硅钢片叠压而成；轴向控制线圈紧挨轴向定子，置于内侧，2 个轴向控制线圈串联，通电后产生轴向控制磁通。

[0011] 作为本发明的进一步改进，所述 3 块永磁体为大小完全相同的块状圆环，采用高性能的稀土永磁材料钕铁硼制成块状圆环形且径向充磁，镶嵌在 3 个径向定子磁极外侧的圆环形凹槽中，同时提供径向和轴向偏磁磁通，可以减小控制线圈的安匝数，进一步缩小磁轴承的体积，减轻了磁轴承重量；同时因不再需要提供偏磁电流，因而降低了功率损耗。

[0012] 作为本发明的进一步改进，3 个径向控制线圈绕在 3 个径向定子磁极上，采用 1 个三相交流功率逆变器驱动控制以产生径向控制磁通，减小了磁轴承整体体积、大大降低了功耗。

[0013] 本发明的有益效果在于：

[0014] 1. 本发明巧妙地实现了径向－轴向三自由度联合控制，相比于二自由度径向磁轴承与单自由度轴向磁轴承的给合，在相同功率或支承力下，大大缩小了磁轴承的轴向长度；或使得相同体积下系统功率可以做得更高，悬浮力可以做得更大。

[0015] 2. 传统直流式径向二自由度磁轴承需要 4 路单极性（或 2 路双极性）功率放大电路，而本发明的一种外转子径向－轴向三自由度混合磁轴承只用 1 个三相交流逆变器即可完全驱动控制径向二自由度，因而减小了功率放大电路的体积，降低了成本，显著降低了功率放大电路的功耗，大大提高了磁轴承的工作效率。

[0016] 3. 采用永磁体同时提供径向和轴向静态偏磁磁场，控制线圈只提供平衡负载和外界干扰的动态磁场，因此，控制线圈的安匝数大大减小，进一步缩小了磁轴承的体积，减轻了磁轴承重量；同时因不再需要提供偏磁电流，因而功率损耗减少，节约了能源，缩小了功放散热器的体积

[0017] 4. 轴向线圈、径向线圈分别采用直流和交流驱动控制，磁场相互独立，易于控制，

简化了系统控制方法。

附图说明

[0018] 图 1 为本发明实施例 1 外转子径向 - 轴向三自由度混合磁轴承的轴向截面图；

[0019] 图 2 为本发明实施例 1 外转子径向 - 轴向三自由度混合磁轴承的径向截面图；

[0020] 图 3 为图 1 的 A-A 剖面左视图；

[0021] 图 4 为图 1 的 A-A 剖面右视图；

[0022] 图中：1 为转子，2 为轴向气隙，3 为径向气隙，4 为径向定子，41、42、43 为径向定子磁极，51、52、53 为径向控制线圈，6 为轴向定子，61、62、63 为轴向定子磁极，71、72、73 为永磁体，81、82 为轴向控制线圈；带箭头的实线 9 为块状圆环形永磁体 71、72、73 产生的径向 - 轴向静态偏磁磁回路；带箭头的虚线 10 表示有轴向控制线圈 81、82 产生的轴向控制磁通在轴向定子 6、径向定子 4、轴向气隙 3 与转子 1 间形成的回路；带箭头的双点画线 11 表示由三相交流功率逆变器驱动的 3 个径向控制线圈 51、52、53 产生的径向控制磁通在径向定子 4、径向气隙 2、转子 1 间形成的回路。

具体实施方式

[0023] 下面结合实施例做进一步说明。

[0024] 本发明首先构建一种外转子径向 - 轴向三自由度混合磁轴承的结构与磁路，根据等效磁路法构建其数学模型。再由此数学模型结合预先给定的设计参数指标对磁轴承的结构参数与电气参数进行公式化推算，依据此公式设计出性能优良的满足实际应用要求的磁轴承。依此结构参数使用有限元分析软件 ANSOFT 软件中的 Maxwell 3D 对磁轴承结构参数进一步优化设计，并验证结构设计原理及磁通分布的正确性。最后，依据数学模型和各实际参数，设计控制器，构建出（位移、电流）双闭环控制系统以及轴向直流功率放大电路和径向交流功率逆变电路等。

[0025] 本发明的原理是通过设计一种磁轴承机械结构与磁路结构，使径向与轴向可以毫无耦合地充分共用永磁体提供的静态偏磁磁通，从而集成了径向二自由度与轴向自由度的联合控制，节省了空间，以利于控制线圈安匝数的增加，相比于二自由度磁轴承与单自由度磁轴承的组合大大减小了磁轴承轴向尺寸；同时采用三相交流逆变器对磁轴承径向控制电流进行驱动控制，减小了功率器件的数量，控制简单，节约了制造成本，提高了工作效率。

[0026] 实施例 1：

[0027] 如图 1 所示，一种外转子径向 - 轴向三自由度混合磁轴承包括转子 1、具有 2 片 ×3 极的双片式六极结构的轴向定子 6、径向定子 4、径向控制线圈 51、52、53、轴向控制线圈 81、82 以及 3 块永磁体 71、72、73。左右两侧每片轴向定子 6 由 3 个沿圆周均匀分布轴向定子磁极 61、62、63 组成，如图 2 所示。带有沿圆周均匀分布的 3 个磁极的径向定子 4 处于 2 片轴向定子 6 中间。3 块块状圆环形永磁体 71、72、73 采用高性能稀土永磁材料钕铁硼制成，形状大小完全相同且径向充磁，镶嵌在 3 个径向定子磁极 41、42、43 外侧的圆环形凹槽中，同时提供径向和轴向偏磁磁通 9。轴向定子 6 与转子 1 之间构成轴向气隙 2，径向定子 4 与转子 1 之间构成径向气隙 3。

[0028] 根据磁回路要求，构造其机械结构与零部件结构；磁路部件需导磁性能好，磁滞

低，并尽量降低涡流损耗与磁滞损耗，由此确定转子 1 由圆环形硅钢片叠压而成，径向定子 4 和轴向定子 6 均采用硅钢片叠压而成。轴向控制线圈 81、82 紧挨轴向定子 6，置于内侧，采用直流线性功放提供轴向控制电流；3 个径向控制线圈 51、52、53 绕在 3 个径向定子磁极 41、42、43 上，如图 3、图 4 所示，采用 1 个三相交流功率逆变器驱动控制。

[0029] 如图 1 和图 2 所示，3 块块状圆环形永磁体 71、72、73 提供的径向 - 轴向静态偏磁磁通 9 从永磁体 N 极流出，经过径向气隙 3 后进入转子 1，然后均衡地分 2 路分别通过左右轴向气隙 2，然后进入左右 2 片轴向定子 6，最后经过径向定子 4 回到永磁体 S 极。轴向控制磁通如图 1 和图 2 中带箭头的虚线 10 所示，轴向控制线圈 81、82 通以直流电后，在轴向定子 6、径向定子 4、轴向气隙 2 与转子 1 之间形成轴向控制磁通回路 10，改变控制电流方向与大小则控制磁通大小和方向相应的发生变化。绕在 3 个径向定子磁极 41、42、43 上的 3 个径向控制线圈 51、52、53 通以三相平衡交流电，在径向定子 4、径向气隙 3 与转子 1 之间均形成径向控制磁通回路 11，如图 1、图 3 和图 4 所示，产生的旋转合成磁通使磁轴承能够克服外界扰动或负载而稳定的工作。

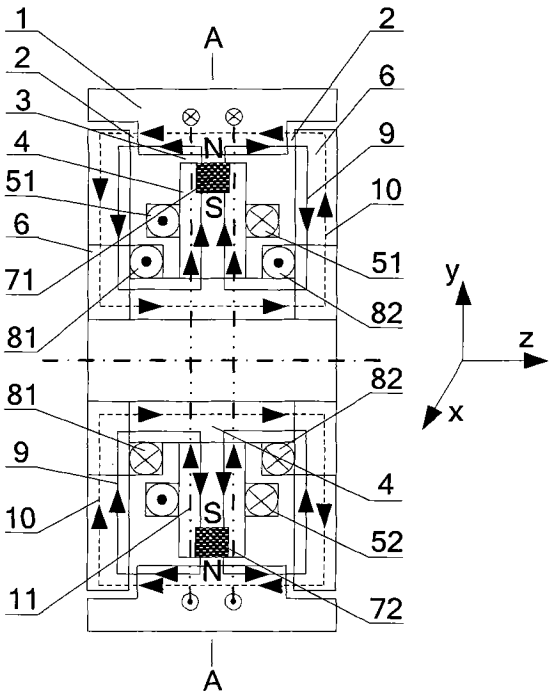

1
2
3
4
51
6
71
81
A
2
6
9
10
51
82
N
S
y
z
x
81
9
10
11
82
4
52
S
N
72
A

图 1

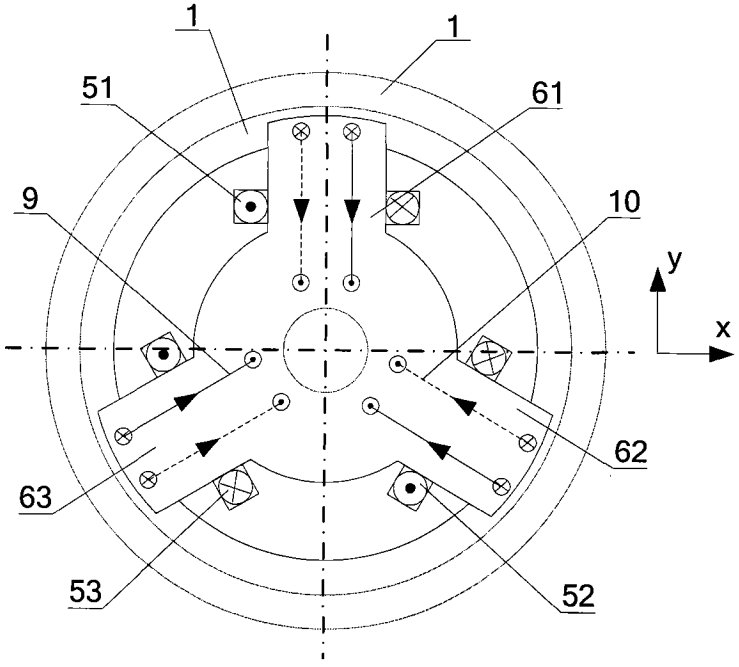

1
1
51
61
9
10
y
x
62
63
53
52

图 2

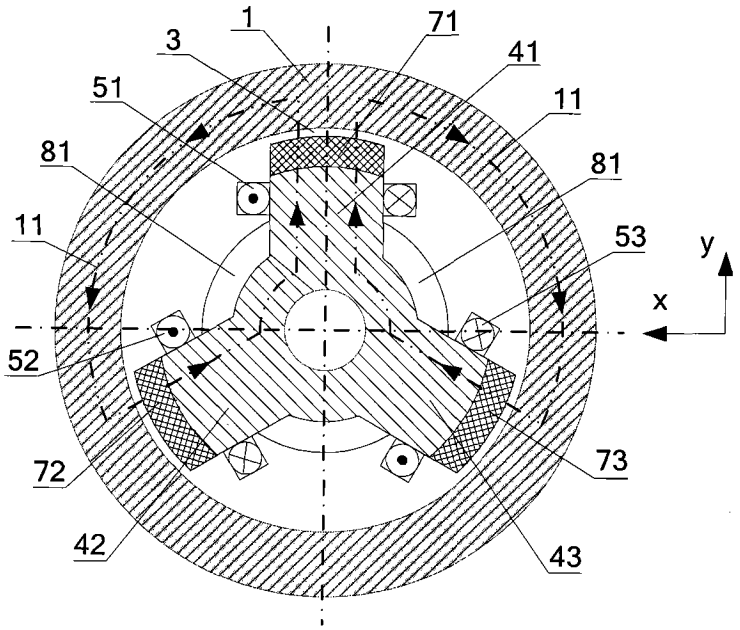

1
71
3
41
51
11
81
81
11
53
y
x
52
72
73
42
43

图 3

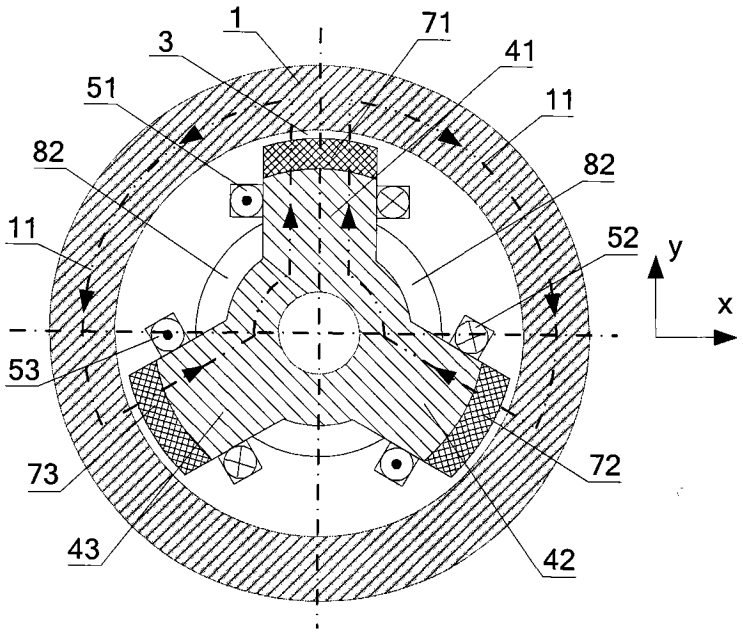

1
71
3
41
51
11
82
82
11
52
y
x
53
73
72
43
42

图 4