

磁悬浮飞轮储能用永磁偏置磁轴承设计*

吕东元^{1,2}, 吕奇超^{1,2}, 李延宝^{1,2}, 周一恒^{1,2}, 陈曦^{1,2}, 蒋燕飞³

- (1. 上海航天控制技术研究所·上海·201109;
2. 上海空间智能控制技术实验室·上海·201109;
3. 上海航天智能装备有限公司·上海·201112)

摘要: 为了降低飞轮储能系统的磁轴承损耗, 设计了一种永磁偏置磁轴承, 分析了该永磁偏置磁轴承的工作原理, 并建立了数学模型。在此基础上, 对永磁偏置磁轴承进行了参数设计和仿真验证。通过飞轮储能系统试验, 验证了该永磁偏置磁轴承设计的合理性。与纯电磁轴承相比, 永磁偏置磁轴承显著降低了磁轴承功耗, 为飞轮储能系统的长期稳定运行提供了基础。

关键词: 永磁偏置磁轴承; 飞轮储能系统; 等效磁路图; 低损耗

中图分类号: TM574.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2021)03-0076-07

Design of Permanent Magnet Biased Magnetic Bearing for Magnetic Suspension Flywheel Energy Storage System

LYU Dongyuan^{1,2}, LYU Qichao^{1,2}, LI Yanbao^{1,2}, ZHOU Yiheng^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, JIANG Yanfei³

- (1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;
2. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109;
3. Shanghai Aerospace Intelligent Equipment Co., Ltd, Shanghai 201112)

Abstract: In order to reduce the loss of magnetic bearing in flywheel energy storage system, a permanent magnet biased magnetic bearing is designed. The working principle of the permanent magnet biased magnetic bearing is analyzed and the mathematical model is established. On this basis, the parameters of the permanent magnet biased magnetic bearing are designed, and the electromagnetic field is analyzed with the finite element simulation software. The design of the permanent magnet biased magnetic bearing is verified by the experiment of the flywheel energy storage system. Compared with the magnetic bearing, the loss of magnetic bearing is significantly reduced, which provides the basis for the long-term stable operation of flywheel energy storage system.

Keywords: permanent magnet biased magnetic bearing; flywheel energy storage system; equivalent magnetic circuit diagram; low loss

0 引言

作为一种利用高速转子进行电能和机械能转换的物理储能装置, 飞轮储能系统 (Flywheel Energy Storage System, FESS) 大多采用磁悬浮轴承进行支承。磁轴承具有无摩擦、无污染、刚度阻尼可调等优点^[1-2], 被广泛应用于卫星姿控飞

轮、控制力矩陀螺、飞轮储能和鼓风机等高速旋转机械领域^[3-6]。传统的主动磁轴承通过为磁轴承绕组施加电流、产生可控的电磁力, 进而将转子悬浮在平衡位置。在长期运行过程中, 磁轴承绕组会消耗大量电能并将电能转换为热量, 进而会增加磁轴承的温度, 不利于 FESS 的稳定运行^[7]。

永磁偏置磁轴承利用由永磁材料产生的电磁

* 收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-01-18

基金项目: 装发预研领域基金 (61407210206, 61402100403)

作者简介: 吕东元 (1990—), 男, 硕士, 工程师。E-mail: lvdongyuan1990@163.com

力替代了电磁轴承中的绝大部分的电磁力, 能够显著降低磁轴承的功耗, 减小励磁绕组匝数, 缩小磁轴承的空间尺寸^[8]。永磁偏置磁轴承系统和电磁轴承系统的组成部分相同, 是由磁轴承定子本体、磁轴承转子、传感器、控制器组成的闭环系统。由永磁体产生的偏置磁场和由控制绕组产生的控制磁场在定子气隙中实现了叠加, 能够实时调整磁轴承转子的受力情况, 从而能够将磁轴承转子稳定悬浮在平衡位置^[9]。

国内外许多研究机构已经将永磁偏置磁轴承应用在了高速电机、卫星动量飞轮和飞轮储能系统中^[10-14]。针对 FESS 中电磁轴承存在的高功耗问题, 本文建立了永磁偏置磁轴承的数学模型, 借助磁场分析软件对磁轴承的结构和电磁参数进行了设计和仿真。基于仿真分析结果, 研制了永磁偏置磁轴承, 开展了 FESS 试验验证。文章从仿真分析和试验研究两方面发现, 永磁偏置磁轴承能够显著降低磁轴承的功耗, 有效提高了 FESS 可靠性。

1 永磁偏置磁轴承的工作原理和数学模型

1.1 永磁偏置磁轴承的工作原理分析

本文所述的 FESS 采用了同极性永磁偏置磁轴承, 其结构形式和磁路如图 1 所示。

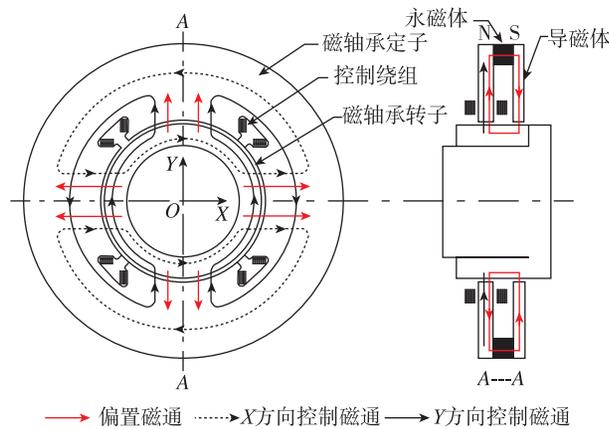


图 1 永磁偏置磁轴承的结构和磁路图

Fig. 1 Structure and magnetic circuit diagram of permanent magnet biased magnetic bearing

磁轴承定子由低损耗硅钢片叠压而成, 能够降低涡流损耗。定子为四齿相对结构, 每对齿上的绕组连接, 磁场方向相同, 提供控制磁通 (如图 1 中的黑线所示), 控制磁通只在定子平面流通; 磁轴承定子与导磁体中间有永磁体, 永磁体为轴向充磁,

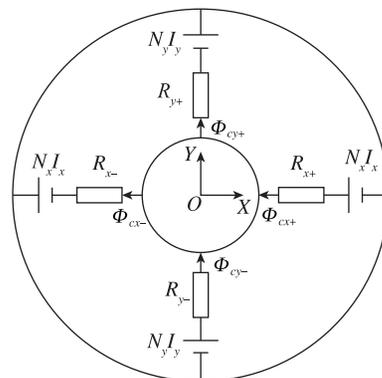
提供偏置磁通 (如图 1 中的红线所示); 偏置磁通由永磁体 N 极出发, 经磁轴承定子、磁轴承转子、导磁体回到永磁体的 S 极, 如图 1 中的红线所示。

永磁偏置磁轴承的工作原理为: 转子在中心位置时, 定子之间的气隙相同, 转子受到的磁力为零。假设转子受到一个沿 X 轴负方向的干扰力的作用, 转子随即离开中心位置向左运动。转子左右两边的气隙将发生变化, 左边气隙减小, 永磁磁通增大, 右边气隙增大, 永磁磁通减小, 转子将进一步向左运动。此时, 通过位移传感器检测出转子偏离中心位置的位移, 并将该位移量传递给控制器。将经过运算而产生的相对应的电流施加在定子齿上的绕组中, 产生方向沿 X 轴正向的控制磁通, 进而转子左边的气隙磁通开始减小, 右边的气隙磁通增加, 转子受到的合力沿 X 轴正向, 转子将回到中心位置。同理, 当转子受到沿 X 轴正向的扰动力, 以及沿 Y 轴方向上的扰动力时, 都能够按照该原理回到中心位置。

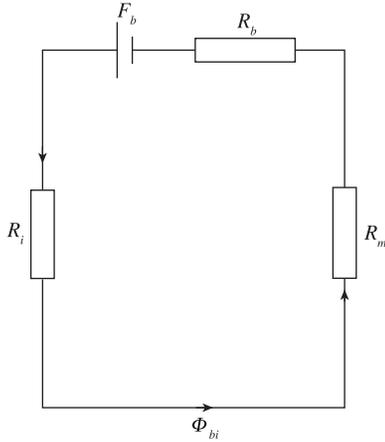
1.2 永磁偏置磁轴承的数学模型

同极性永磁偏置磁轴承的磁路既有轴向, 又有径向, 可通过不同导磁性能的介质, 因此磁场分布比较复杂。通过等效磁路法建立永磁偏置磁轴承的等效磁路图, 能够准确分析该磁轴承的磁场分布。该永磁偏置磁轴承的等效磁路图如图 2 所示。

其中, $N_x I_x$ 、 $N_y I_y$ 为控制绕组安匝数; R_i ($i = x +, x -, y +, y -$) 分别为转子在 X、Y 方向上的气隙磁阻 (单位: H^{-1}); R_b 为永磁体内阻; R_m 为导磁体与转子之间的气隙磁阻; F_b 为永磁体对外提供的磁动势 (单位: A); ϕ_{ci} ($i = x +, x -, y +, y -$) 分别为 X、Y 正负方向气隙中的控制磁通量 (单位: Wb); ϕ_{bi} ($i = x +, x -, y +, y -$) 为偏置磁通量 (单位: Wb)。为了简化计算, 不考虑



(a) 控制磁场等效磁路图



(b) 偏置磁场等效磁路图

图2 磁轴承等效磁路图

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit diagram of magnetic bearing

漏磁和铁芯磁阻, 可利用基尔霍夫定律建立控制磁场和偏置磁场方程, 如式(1)和式(2)所示

$$\begin{cases} \phi_{cx+} + \phi_{cy-} = \phi_{cx-} + \phi_{cy+} \\ \phi_{cx+} R_{x+} - \phi_{cy-} R_{y-} = N_x I_x - N_y I_y \\ \phi_{cy-} R_{y-} - \phi_{cx-} R_{x-} = N_y I_y + N_x I_x \\ \phi_{cx-} R_{x-} - \phi_{cy+} R_{y+} = N_x I_x - N_y I_y \\ \phi_{bi} (R_b + R_m + R_i) = F_b \end{cases} \quad (1)$$

$$\phi_{bi} (R_b + R_m + R_i) = F_b \quad (2)$$

由上述方程可得 X、Y 方向的控制磁通量和偏置磁通量

$$\begin{cases} \phi_{cx+} = \frac{\left(\frac{1}{R_{y-}} + \frac{2}{R_{x-}} + \frac{1}{R_{y+}}\right) N_x I_x + \left(\frac{-1}{R_{y+}} + \frac{1}{R_{y-}}\right) N_y I_y}{1 + \frac{R_{x+}}{R_{y-}} + \frac{R_{x+}}{R_{x-}} + \frac{R_{x+}}{R_{y+}}} \\ \phi_{cx-} = \frac{\left(\frac{2}{R_{y-}} + \frac{1}{R_{y-}} + \frac{1}{R_{y+}}\right) N_x I_x + \left(\frac{-1}{R_{y-}} + \frac{1}{R_{y+}}\right) N_y I_y}{\frac{R_{x-}}{R_{y+}} + \frac{R_{x-}}{R_{y-}} + 1 + \frac{R_{x-}}{R_{x+}}} \\ \phi_{cy+} = \frac{\left(\frac{-1}{R_{x-}} + \frac{1}{R_{x+}}\right) N_x I_x + \left(\frac{1}{R_{x+}} + \frac{2}{R_{y-}} + \frac{1}{R_{x-}}\right) N_y I_y}{\frac{R_{y+}}{R_{x+}} + \frac{R_{y+}}{R_{y-}} + \frac{R_{y+}}{R_{x-}} + 1} \\ \phi_{cy-} = \frac{\left(\frac{-1}{R_{x+}} + \frac{1}{R_{x-}}\right) N_x I_x + \left(\frac{1}{R_{x+}} + \frac{1}{R_{x-}} + \frac{2}{R_{y+}}\right) N_y I_y}{\frac{R_{y-}}{R_{x+}} + 1 + \frac{R_{y-}}{R_{x-}} + \frac{R_{y-}}{R_{y+}}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi_{bi} = \frac{F_b}{R_b + R_m + R_i} \quad (4)$$

假设转子向 X 轴、Y 轴正方向产生两个微小位移 x 、 y (单位: mm), 则气隙磁阻可表示为

$$\begin{cases} R_{x+} = \frac{g_0 - x}{\mu_0 S_0}, R_{x-} = \frac{g_0 + x}{\mu_0 S_0}, \\ R_{y+} = \frac{g_0 - y}{\mu_0 S_0}, R_{y-} = \frac{g_0 + y}{\mu_0 S_0} \end{cases} \quad (5)$$

其中, μ_0 为空气磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)); g_0 为磁轴承气隙长度 (单位: mm); S_0 为磁极面积 (单位: mm^2)。对 X、Y 方向上的控制磁通量和偏置磁通量进行叠加, 可得到转子的承载力 F_x 、 F_y (单位: N) 方程如下

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{2\mu_0 S_0} [(\phi_{bx+} + \phi_{cx+})^2 - (\phi_{bx-} + \phi_{cx-})^2] \\ F_y = \frac{1}{2\mu_0 S_0} [(\phi_{by+} + \phi_{cy+})^2 - (\phi_{by-} + \phi_{cy-})^2] \end{cases} \quad (6)$$

2 永磁偏置磁轴承的参数设计

在 FESS 中, 转子一般为大惯量金属轮体且采用垂直安装的方式。由转子动平衡等级 G2.0 和转速 3000r/min 的数据可计算出, 当转子质量为 145kg 时, 上径向磁轴承所受的动载荷为 325N, 下径向磁轴承所受的动载荷为 585N。转子倾斜可能导致的静载荷可假定为转子自重的 10%, 分别为 50N 和 90N, 磁轴承负载安全系数可选取为 1.5。由此, 得到上下径向磁轴承的最大承载力分别为 538N、968N。因此, 本文以该最大承载力为设计目标, 对磁轴承的电磁结构参数进行了设计, 表 1 为磁轴承设计的输入条件。

表 1 FESS 磁轴承设计输入条件

Tab. 1 Design input conditions of magnetic bearing for FESS

项目	数值
不平衡等级/G	2.0
不平衡量/(kg·mm)	0.092
转子质量/kg	145
径向磁轴承承载力/N	538/968

磁轴承大多选用硅钢片、电工纯铁等软磁材料, 该软磁材料在磁感应强度为 1.2T 以下时, 磁化曲线的线性度比较好, 因此可确定气隙偏置磁感应强度为 0.6T。在受到最大承载力作用时, 气隙磁感应强度为 1.2T。在整个磁轴承励磁过程中,

电磁力的线性化程度较好。

由式(6)可得径向承载力公式为

$$F_x = F_y = \frac{2B_b B_c S_0}{\mu_0} \quad (7)$$

其中, B_b 为气隙偏置磁感应强度(单位: T); B_c 为气隙控制磁感应强度(单位: T)。根据承载力和气隙磁感应强度设计指标, 可得磁轴承的磁极面积 S_0 。

由磁极面积, 可得到气隙控制磁通量

$$\phi_{ci} = B_c S_0 \quad (8)$$

其中, $i = x +, x -, y +, y -$, 进一步可求得控制绕组等参数。

在永磁偏置磁轴承中, 永磁体可提供偏置磁场。在气隙磁阻确定的条件下, 永磁磁动势的大小决定了气隙磁感应强度的大小, 永磁体参数设计主要用于确定充磁厚度和永磁体截面积。目前常用的永磁材料包括铁氧体、钕铁硼和钕钴。由于热稳定性比较好^[15], 钕钴材料已被广泛应用于航空航天等多个领域, 本文选择钕钴作为永磁体, 以提供偏置磁场。

在进行永磁体设计时, 为了充分利用永磁体的能量, 可将永磁体的工作点设置在最大磁能积附近。由于钕钴比较脆, 圆环形状钕钴的制作工艺比较复杂且强度较低, 本文采用了由若干圆柱体组成的圆环形状的钕钴, 以作为磁动势源。因此, 永磁体的设计工作主要集中于永磁体厚度、直径和数量的设计。

从磁路图得到永磁体的磁动势, 可以求得永磁体的磁感应强度 B_m

$$F_b = H_m L = \left(\frac{B_r}{\mu_b} - \frac{B_m}{\mu_b} \right) L \quad (9)$$

其中, H_m 为磁场强度(单位: A/m); B_r 为剩余磁感应强度(单位: T); μ_b 为永磁体磁导率(单位: H/m); L 为永磁体厚度(单位: mm)。进而, 可求得永磁体的截面积 S_p (单位: mm^2)

$$S_p = \frac{\phi_{bi}}{B_m} \quad (10)$$

综合导磁体的结构尺寸能够得到永磁体的直径、数量和空间位置关系。

表2是径向永磁偏置磁轴承的结构尺寸和其他最终参数。

3 永磁偏置磁轴承的磁场仿真

永磁偏置磁轴承由永磁体提供偏置磁场。由

于永磁磁场不稳定, 且结构复杂, 导致磁路漏磁比较多。为了对永磁偏置磁轴承进行精确的磁场分析, 可借助有限元仿真软件对设计结果进行电磁场仿真。图3为永磁偏置磁轴承的磁场分布。

表2 永磁偏置磁轴承的设计参数

Tab. 2 Design parameters of permanent magnet biased magnetic bearing

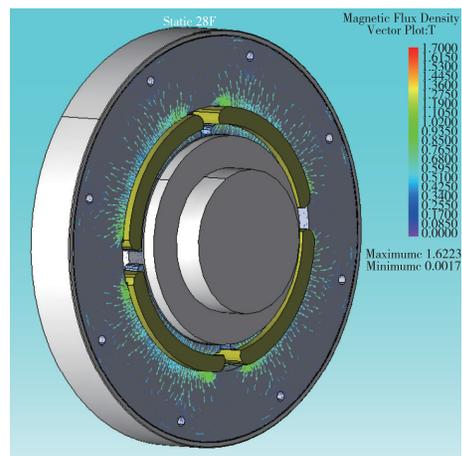
项目	数值
定子铁芯外径/mm	239
定子铁芯内径/mm	124
定子铁芯厚度/mm	11/20
转子铁芯外径/mm	123
单边气隙/mm	0.5
单边保护气隙/mm	0.2
永磁体牌号	SmCo2; 17
永磁体高度/mm	15
永磁体直径/mm	22
永磁体数量/个	16
设计最大承载力/N	555/990
设计最大控制电流/A	4.5

为了分析磁轴承在整个控制电流区间和悬浮间隙区间的悬浮性能, 对磁轴承承载力随电流和位移变化的情况进行了仿真分析。

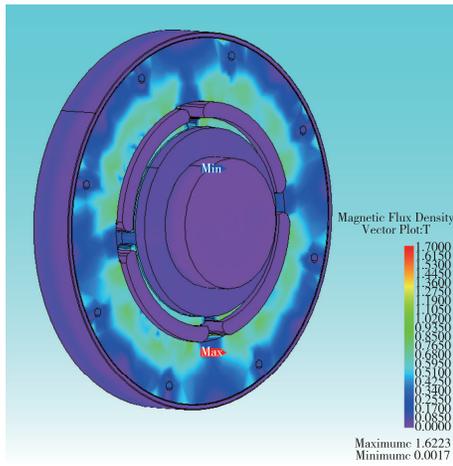
图4为静态悬浮时, 径向磁轴承承载力随控制电流变化的情况。

从图4可以看出, 当转子在中心位置附近时, 磁轴承承载力随电流变化呈现出了线性的特点。

图5为控制电流为4.5A时, 径向磁轴承承载力随转子在X方向上的偏移量的变化情况。



(a) 磁力矢量图



(b) 磁密云图

图 3 永磁偏置磁轴承磁场

Fig. 3 Magnetic field of permanent magnet bearing

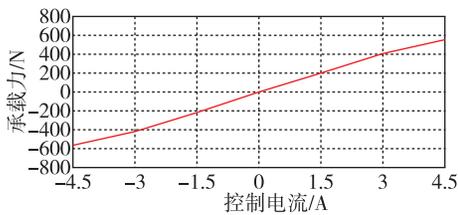


图 4 承载力随电流变化的曲线

Fig. 4 Bearing capacity versus current curve

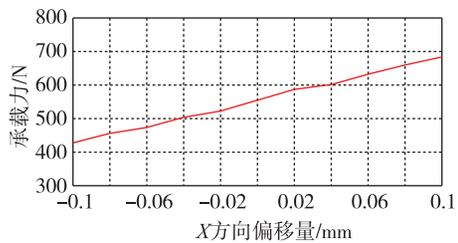


图 5 承载力随位移变化的曲线

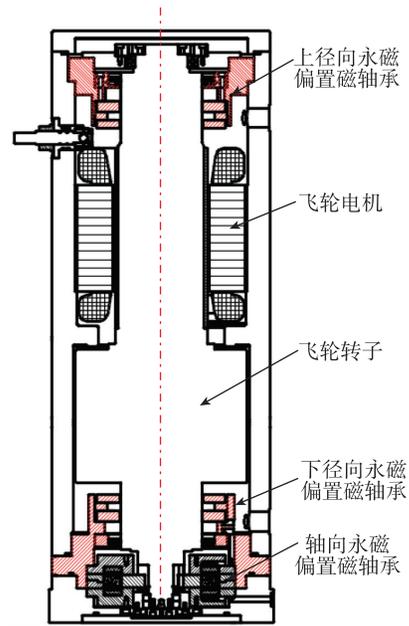
Fig. 5 Bearing capacity versus displacement curve

从图 5 可以得出如下结论，径向磁轴承转子在整个悬浮间隙区间内，力随位移的变化呈现出线性的特点，从而验证了磁轴承参数设计的合理性。在整个电流区间和位移曲线内，磁轴承的悬浮性能较好。

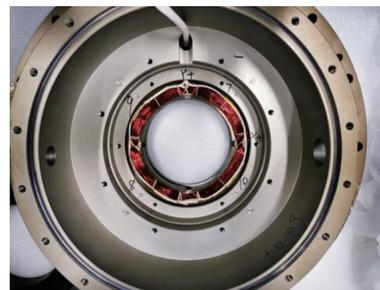
4 永磁偏置磁轴承的实验验证

磁悬浮 FESS 采用五自由度永磁偏置磁轴承。由于 FESS 采用了垂直安装的方式，从空间上，磁悬浮 FESS 可分为上径向永磁偏置磁轴承、下径向

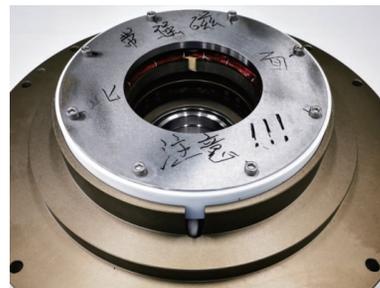
永磁偏置磁轴承，以及轴向永磁偏置磁轴承。图 6 为磁悬浮 FESS 的整体结构和永磁偏置磁轴承组件的实物照片。



(a) FESS 结构图



(b) 上径向永磁偏置磁轴承



(c) 下径向永磁偏置磁轴承

图 6 飞轮储能系统

Fig. 6 Flywheel energy storage system

通过 FESS，可验证永磁偏置磁轴承的静态悬浮性能和动态性能。图 7 为 FESS 在 20000r/min

时各个方向的转子位移信号和磁轴承电流信号。其中, X1、Y1 和 X2、Y2 分别代表了上径向磁轴承和下径向磁轴承。

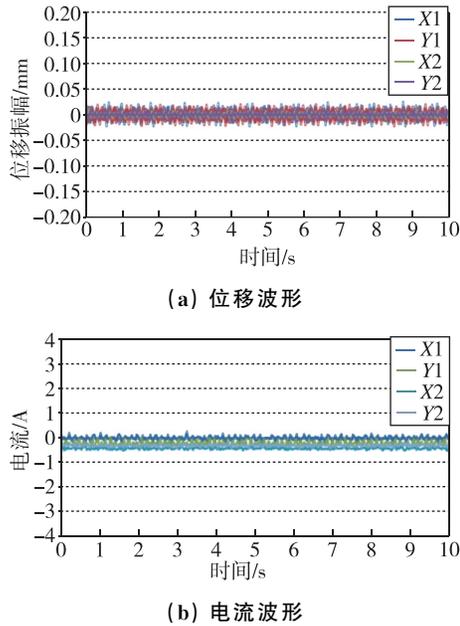


图 7 磁轴承位移和电流信号

Fig. 7 Displacement and current signal of magnetic bearing

从图 7 可以看出, 转子位移振幅 $\leq 0.05\text{mm}$, 径向电流在 $0\sim 0.5\text{A}$ 范围内波动。由此可以认为, 永磁偏置磁轴承的悬浮性能较好。

传统的电磁轴承控制为差分控制, 绕组电流包含偏置电流和控制电流。相对永磁偏置磁轴承而言, 磁轴承的功耗比较高, 永磁偏置磁轴承的偏置磁场由永磁体提供。因此, 绕组中只有控制电流, 且电流较小, 永磁偏置磁轴承能够降低磁轴承的功耗。

图 8 为 FESS 转子在电磁轴承支承下, 在各个方向上的电流信号。

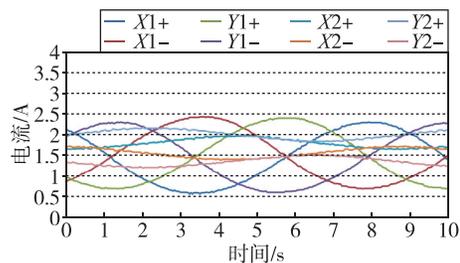


图 8 电磁轴承电流波形

Fig. 8 Current waveform of active magnetic bearing

对比图 7 (b) 和图 8 可知, 在相同负载情况下, 永磁偏置磁轴承各个方向的电流与电磁轴承相比得到明显降低, 从而能够说明永磁偏置磁轴承能够大大降低磁轴承的功耗。

5 结 论

本文针对 FESS 研究了一种永磁偏置磁轴承, 分析了该永磁偏置磁轴承的工作原理, 并建立了数学模型, 以最大承载力为设计目标对永磁偏置磁轴承进行了结构和电磁参数设计, 并借助有限元仿真软件分析了永磁偏置磁轴承的电磁场分布, 在 FESS 上对研制的永磁偏置磁轴承进行了悬浮和旋转试验, 并将其与传统的电磁轴承进行了比较。比较结果表明, 相比传统电磁轴承, 永磁偏置磁轴承能够大大降低磁轴承的功耗, 为 FESS 长期稳定运行提供了基础。

参考文献 (References)

- [1] 戴兴建, 邓占峰, 刘刚, 等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7): 133-140.
- DAI X J, DENG Z F, LIU G, et al. Review on advanced flywheel energy system with large scale [J]. Transactions of China Electrotechnical Society [J]. 2011, 26 (7): 133-140 (in Chinese) .
- [2] BROWN D R, CHVALA W D. Flywheel energy storage: an alternative to batteries for UPS systems [J]. Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering, 2005, 102 (5): 7-26.
- [3] 刘强, 赵明师, 韩邦成, 等. 磁悬浮框架飞轮磁轴承技术研究与发展现状 [J]. 宇航学报, 2019, 40 (11): 1251-1261.
- LIU Q, ZHAO M S, HAN B C, et al. Research and development status of magnetic bearing technology on magnetically suspended gimballed flywheel [J]. Journal of Astronautics, 2019, 40 (11): 1251-1261 (in Chinese) .
- [4] 韩邦成, 贺赞, 翟鲁鑫, 等. 单框架磁悬浮控制力矩陀螺的损耗计算及热-结构耦合分析 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (10): 2463-2474.
- HAN B C, HE Z, ZHAI L X, et al. Loss calculation and thermal-structural coupling analysis of a single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26 (10): 2463-2474 (in Chinese) .
- [5] 邱文祥, 李大兴, 夏革非, 等. 一种新型低成本飞轮储能用永磁偏置磁轴承 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (1): 58-62.

- QIU W X, LI D X, XIA G F, et al. A low cost permanent magnet biased bearing used in flywheel energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (1): 58-62 (in Chinese).
- [6] 阴宏宇, 刘路, 王跃方, 等. 主动磁悬浮轴承在压缩机及鼓风机应用的技术进展 [J]. 风机技术, 2019, 61 (2): 88-94.
- YIN H Y, LIU L, WANG Y F, et al. Progress of active magnetic bearings in compressors and blowers [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2019, 61 (2): 88-94 (in Chinese).
- [7] 孙玉坤, 郭帅坡, 杨帆. 飞轮储能用混合磁悬浮轴承温度场分析 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46 (8): 76-81.
- SUN Y K, GUO S P, YANG F. Temperature field analysis of hybrid magnetic bearings for flywheel energy storage [J]. Motor and Control Application, 2019, 46 (8): 76-81 (in Chinese).
- [8] 赵旭升, 邓智泉, 王晓琳, 等. 永磁偏置磁轴承的研究现状及其发展 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (9): 9-20.
- ZHAO X S, DENG Z Q, WANG X L, et al. Research status and development of permanent magnet biased magnetic bearings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (9): 9-20 (in Chinese).
- [9] 吴华春, 于海涛, 胡帅, 等. 同极永磁偏置径向磁悬浮轴承特性分析 [J]. 轴承, 2018, 7: 40-45.
- WU H C, YU H T, HU S, et al. Analysis on characteristics of homo-polar permanent biased radial magnetic bearings [J]. Bearing, 2018, 7: 40-45 (in Chinese).
- [10] IMOBERDORF P, ZWYSSIG C, ROUND S D, et al. Combined radial-axial magnetic bearing for a 1kW, 50000rpm permanent magnet machine [C] // 21st IEEE Applied Power Electronics Conference, Anaheim, IEEE, 2007: 14341440.
- [11] DOWNER J, GOLDIE J, GONDHALKAR V, et al. Aerospace applications of magnetic bearings [C] // 2nd International Symposium on Magnetic Suspension Technology. USA: NASA, 1993: 3-26.
- [12] MURPHY B T, OUROUA A, CAPRIO M T, et al. Permanent magnet bias, homopolar magnetic bearings for a 130kW-hr composite flywheel [C] // 9th International Symposium on Magnetic Bearings, Lexington: the University of Kentucky, 2004.
- [13] 刘飞, 王汝骏, 郭中洋, 等. 国外 MEMS 陀螺及组合力学环境适应性技术研究进展 [J]. 飞控与探测, 2019, 2 (6): 12-17.
- LIU F, WANG R T, GUO Z Y, et al. Development of mechanical environment adaptability technology for MEMS gyroscopes and modules abroad [J]. Flight Control & Detection, 2019, 2 (6): 12-17 (in Chinese).
- [14] 于翔宇, 赵万良, 苏岩, 等. MEMS 多环陀螺调频控制系统 [J]. 飞控与探测, 2020, 3 (1): 62-68.
- YU X Y, ZHAO W L, SU Y, et al. MEMS vibrating ring gyroscope frequency modulation control system [J]. Flight Control & Detection, 2020, 3 (1): 62-68 (in Chinese).
- [15] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- TANG R Y. Modern permanent magnet machines — theory and design [M]. Beijing: China Machine Press, 1997 (in Chinese).