

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

陈克鑫, 于洋, 王彤, 冯丽菊.
磁力离合器轴系偏差特性分析.
电机与控制应用, 2021, 48(12): 48.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

磁力离合器轴系偏差特性分析

陈克鑫¹, 于洋², 王彤³, 冯丽菊³

(1. 中国船舶集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;

2. 海军驻哈尔滨地区第三军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150078;

3. 哈尔滨广瀚动力传动有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要: 磁力离合器(MC)安装过程中存在一定的轴系偏差。针对两转子之间存在角向和径向偏差的情况, 基于偏差模型和三维有限元方法, 分析和研究 MC 的磁场分布、涡流分布、轴向磁拉力、转矩等基本电磁特性。随着径向偏差距离的增加, 气隙磁场和导体盘涡流分布整体沿径向偏差, MC 转矩呈下降趋势。随着角向偏差的增加, 气隙磁场和涡流密度呈非对称分布, 且出现明显的不平衡轴向磁拉力, 但是输出转矩先下降然后平稳上升。

关键词: 磁力离合器; 轴系偏差; 磁场分布; 涡流分布; 轴向磁拉力; 转矩特性

中图分类号: TM 359.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)12-0048-06

doi: 10.12177/emca.2021.141

Research on Shafting Deviation Characteristics of Magnetic Clutch

CHEN Kexin¹, YU Yang², WANG Tong³, FENG Liju³

(1. No.703 Research Institute of CSSC, Harbin 150078, China;

2. The Third Representative Office of the Navy in Harbin, Harbin 150078, China;

3. Harbin Guanghan Power Transmission Co., Ltd., Harbin 150078, China)

Abstract: There is a certain shafting deviation during the installation of magnetic clutch (MC). In view of the angular and radial deviation between the two rotors, the magnetic field distribution, eddy current distribution, axial magnetic pull, torque and other basic electromagnetic characteristics of the MC are analyzed and studied by deviation model and three-dimensional finite element method. With the increase of the radial deviation distance, the air gap magnetic field and eddy current distribution of conductor disk are shifted along the radial direction, and the torque of MC decreases gradually. With the increase of the angular deviation, the air gap magnetic field and eddy current density are asymmetrically distributed, and it shows obvious unbalanced axial magnetic pull, but the output torque drops first and then rises steadily.

Key words: magnetic clutch (MC); shafting deviation; magnetic field distribution; eddy current distribution; axial magnetic pull; torque characteristics

0 引 言

磁力离合器(MC)是一种基于异步传动原理的传动装置。其主、从动旋转构件的一侧设置永磁体, 另一侧设置金属导体, 分别构成永磁转子和导体转子^[1-2]。当两转子间存在相对运动时, 导

体盘在交变永磁磁场作用下产生涡流, 涡流磁场与永磁磁场相互作用, 产生电磁转矩^[1,3], 改变永磁转子和导体转子之间的气隙, 可实现离合及输出转矩的调节^[4-6]。理想状态下, 永磁转子和导体转子完全同轴, 但实际使用条件下, 尤其是对于船舱应用环境, 两转子轴心线存在安装偏差, 偏差

收稿日期: 2021-09-30; 收到修改稿日期: 2021-11-20

作者简介: 陈克鑫(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为船用离合器。

会对磁力离合器的性能产生一定的影响。

文献[7-8]通过基于磁矢量的磁场解析方法,对不同结构 MC 提出了相应的解析建模,实现了快速电磁特性预测。文献[9-10]基于等效磁路法,研究了装置的气隙磁场、涡流分布以及输出转矩等基本电磁特性。文献[11-14]采用优化方法对 MC 的结构参数进行了优化。上述文献均针对无轴系偏差的 MC 进行了深入的研究,而针对有轴系偏差的 MC 分析较少,Wallace 等^[15]研究了径向偏差情况下永磁耦合器的对中和容错能力,但研究尚存不足,没有给出径向偏差及角向不对中情况下 MC 的电磁特性变化规律。

本文结合轴系偏差模型和三维有限元方法,研究和分析在轴系角向和径向偏差情况下,MC 磁场分布、涡流分布、轴向磁拉力变化规律和转矩特性。

1 MC 偏差模型

MC 结构如图 1 所示,永磁转子上的圆周分布磁极交替的永磁体,导体盘采用整周的圆环结构,永磁体及导体盘的背部为铁心,铁心用于封闭磁路。

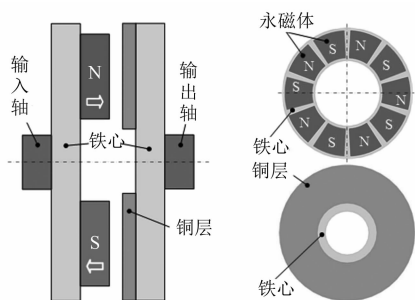


图 1 MC 结构示意图

1.1 径向偏差

径向偏差是指永磁转子与导体转子轴线沿着径向偏差,其模型如图 2 所示。两转子轴线无偏差状态下,标记导体盘内半径处外延长度为 l_{ohi} ,外半径处外延长度为 l_{oho} 。径向偏差距离 d 小于 l_{ohi} 与 l_{oho} 之间的最小值时,导体盘可完全覆盖永磁磁场,导体盘涡流密度分布依然可以产生完整的有效转矩,但是导体盘轴向磁力沿轴心非对称分布,出现偏心现象,由此转子上会产生一定的附加弯矩。

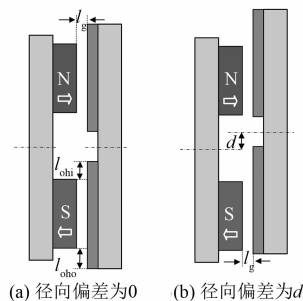


图 2 径向偏差情况下 MC 模型示意图

当离合器径向偏心距离 d 大于 l_{ohi} 和 l_{oho} 时,随着径向偏移的变化,导体转子与永磁转子正对耦合面积变化,会使导体转子较链的有效永磁磁通及空气较链的永磁漏磁通发生改变,导致导体盘上的感应涡流产生变化,影响 MC 的输出转矩。

1.2 角向偏差

角向偏差指永磁转子与导体转子轴线存在倾斜角,其偏差角度为

$$\theta = \arctan\left(\frac{2l_z}{D_{mo}}\right) \quad (1)$$

式中: l_z 为导体转子铁心中线沿 z 轴偏差的水平距离,其最大值为气隙长度; D_{mo} 为永磁体外径。

当 l_z 为气隙长度 l_g 时,可获得最大偏差角度:

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{l_g}{r_{mo}}\right) \quad (2)$$

如果角向偏差大于最大偏差角 $\theta_{\max}$,永磁转子和导体转子会发生碰撞,造成 MC 的损害。

以图 3 为例,离合器存在角向偏差时,两转子盘之间的气隙分布不均匀,一侧减小,另一侧增大。气隙减小侧,永磁体对导体盘的电磁感应作用变强,导体盘感应涡流密度增大;气隙增大侧导体盘感应涡流密度降低。相比无偏差状态导体转子的涡流密度沿轴线呈非对称分布,造成转子受到轴向不平衡拉力及附加弯矩,降低轴系运转的稳定性。

2 基于三维有限元方法的仿真分析

针对 MC 径向偏差和角向偏差两种情况分别进行仿真分析,研究偏差对 MC 的磁场分布、涡流分布、转矩特性等基本电磁特性的影响。分析对象的 MC 结构参数如表 1 所示,鉴于偏差条件两

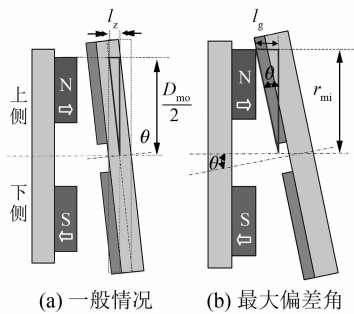


图3 角向偏差情况下MC模型示意图

转子之间磁场的非对称分布,本文采用 ANSYS 软件建立离合器磁路的全尺寸有限元模型进行计算分析,在模型的求解域外侧施加零矢量边界条件,计算过程不考虑温升对永磁体性能和导体盘电导率的影响。

分析径向偏差问题时,角向偏差设定为 0,仅改变径向偏差,径向偏差从 0 mm 增加至 10 mm;分析角向偏差问题时,径向偏差设定为 0,仅改变角向偏差,轴线倾斜角从 0°增加至 2.0°。

表1 MC 的主要参数

参数名称	参数值
永磁体内半径/mm	50
永磁体外半径/mm	90
永磁转子铁心内半径/mm	40
永磁转子铁心外半径/mm	100
扇形永磁体占空比	0.5
永磁体厚度/mm	10
永磁转子铁心厚度/mm	10
极对数	8
转差率	0.05
输入转速/(r·min ⁻¹)	1 500
导体盘内半径/mm	40
导体盘外半径/mm	100
导体转子铁心内半径/mm	40
导体转子铁心外半径/mm	100
导体盘厚度/mm	5
导体转子铁心厚度/mm	10
最小气隙长度/mm	2
角向偏差/(°)	0~2.0
径向偏差/mm	0~10

2.1 偏差条件下的磁场分析

不同径向偏差下,MC 导体盘表面气隙磁密分布如图 4 所示。随着径向偏差(x 轴负方向)的增加,导体盘表面气隙磁密幅值基本上保持不变,但是,磁场整体沿着 x 轴负方向移动,移动距离与轴心偏差距离 d 大致相同,且永磁磁通与导体盘出现未耦合区域,导致用于产生涡流和转矩的有效永磁磁通量下降。

不同角向偏差下,MC 导体盘表面的气隙磁密分布如图 5 所示。随着角向偏差的增加,永磁磁通与导体盘耦合面积基本不变,转子上的磁拉力作用位置基本沿轴心对称,导体盘表面磁密幅值非对称分布现象凸显,气隙小的一侧,气隙磁场增强,而另一侧,气隙磁场减弱。角向偏差角 θ 从 0.4°增加至 1.6°时,气隙小的一侧区域磁密峰值约从 0.4 T 增加至 0.6 T。

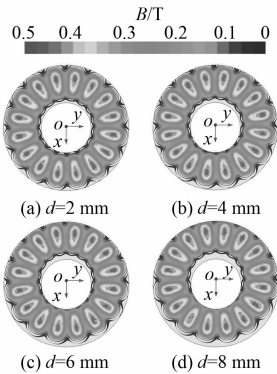


图4 不同径向偏差下导体转子表面磁场分布

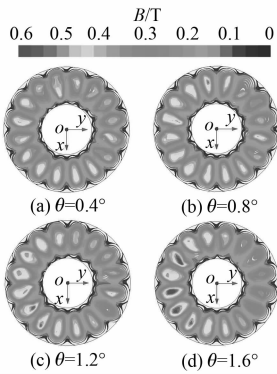


图5 不同角向偏差下导体转子表面磁密分布

2.2 偏差条件下的涡流分析

不同径向和角向偏差下,MC 导体盘内涡流密度分布分别如图 6 和图 7 所示。径向偏差情况

下,导体盘涡流分布整体沿着 x 轴负方向移动,且移动距离与径向偏差 d 基本相等,但涡流密度值变化不明显;角向偏差情况下,涡流密度呈左右非对称分布,且随着角向偏差角度的增加,不对称现象加剧,以 xoz 面为分界面(z 轴正方向为垂直纸面向外),一侧涡流密度增加,另一侧涡流密度减小。随着角向偏差角度从 0.4° 增加至 1.6° ,导体盘涡流增强区域涡流密度峰值从 $4.4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 增加至 $7.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。

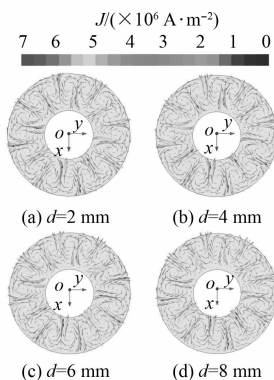


图6 不同径向偏差下导体盘表面涡流分布

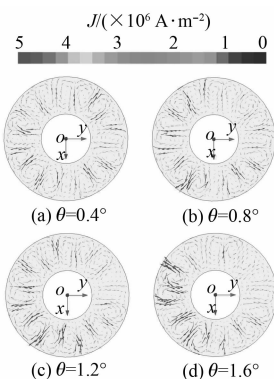


图7 不同角向偏差下导体盘表面涡流分布

2.3 偏差条件下的轴向作用力分析

径向偏差条件下,MC 导体盘受到的轴向作用力的力密度分布如图8和图9所示,随着径向偏差的增加,导体盘表面轴向(z 向)作用力分布整体沿着径向偏差方向移动。径向偏移过程中, yoz 两侧气隙长度不变,气隙磁场强度不变,导体盘表面力密度幅值不变,但是,力密度分布沿 x 轴的负方向偏移。因此,整个 yoz 面上部分的面积增加,轴向力增加,同时, yoz 面下半部分面积减小,轴向力减小。MC 导体盘受到的轴向合力随

着轴向偏差的增加未发生明显变化,基本保持在 -900 N 上下,相对无偏差状态下波动幅度不超过 3% (轴向力为负,表明此时两转子间轴向力为引力)。

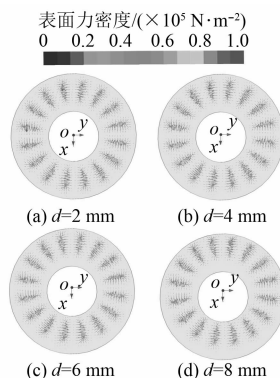


图8 不同径向偏差下轴向力分布云图

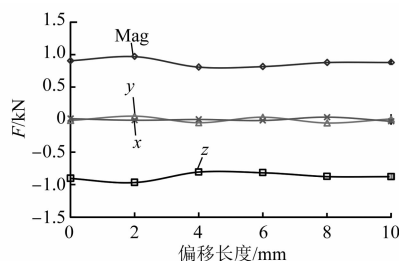


图9 不同径向偏差下轴向力变化趋势($s=0.05$)

角向偏差下,MC 轴向力变化情况如图10和图11所示,随着角向偏差的增加,MC 轴向力上下两个半圆出现不对称情况,磁密幅值高的一侧,磁拉力更大。随着角向偏差角度从 0.4° 增加至 1.6° ,磁场增强区域力密度峰值从 $1.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 增加至 $1.4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。MC 导体盘受到的轴向合力随着角向偏差的增加有小幅增加趋势,相对无偏差状态最大增加幅度约为 5%。

2.4 偏差条件下的转矩特性分析

当轴系径向偏差从 0 mm 增加至 10 mm 时,MC 的转矩特性曲线如图12所示。随着径向偏差的增加,稳态平均转矩大约从 $40.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 下降至 $34.6 \text{ N} \cdot \text{m}$,径向偏差超过 8 mm 后,扭矩的下降幅度明显增加。随着仿真模型运行时间的增加,转矩逐渐平稳,转矩曲线上存在小幅度的脉动,这是由于气隙磁场存在谐波,导致涡流密度存在谐波,切向受力存在一定程度的分布不均,另外,有限元仿真网格剖分密度造成的误差也有一定影响。

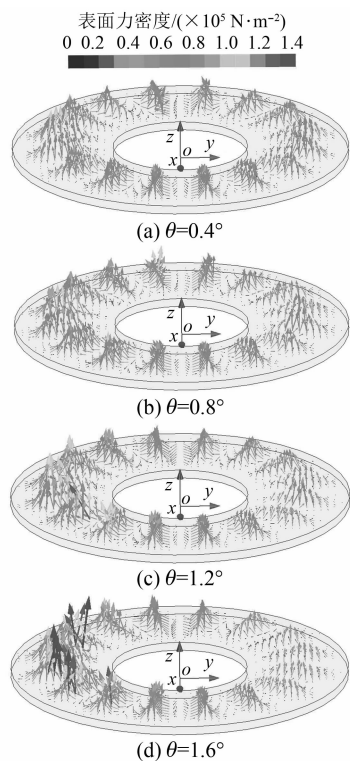
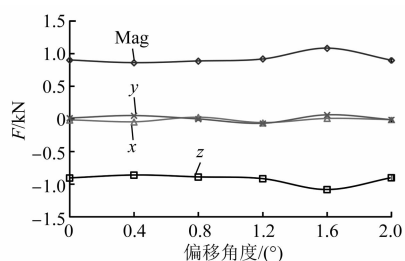


图 10 不同角向偏差轴向作用力分布云图

图 11 不同角向偏差轴向作用力变化趋势($s=0.05$)

当轴系角向偏差从 0° 增加至 2.0° 时, MC 的转矩特性曲线如图 13 所示。随着计算运行时间的增加, 转矩曲线上存在小幅度的脉动。随着角向偏差的增加, 转矩先从 $40.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 下降到 $35.7 \text{ N}\cdot\text{m}$, 然后上升至 $46.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。这是因为角向偏差时, MC 气隙一侧增加, 一侧减小, 气隙磁场变化和气隙大小间为非线性关系, 偏差大到一定程度后, 气隙减小磁场增大的幅度大于气隙增大磁场的减弱程度, 造成其转矩变化存在一个拐点。随着角向偏差的增加, 转矩脉动大约从 1.4% 降至 1.2% , 然后上升至 2.0% , 角向偏差导致的转矩脉动明显大于径向偏差变化对转矩脉动的影响, 这是因为角向偏差造成的不对称轴向磁力更加明显。

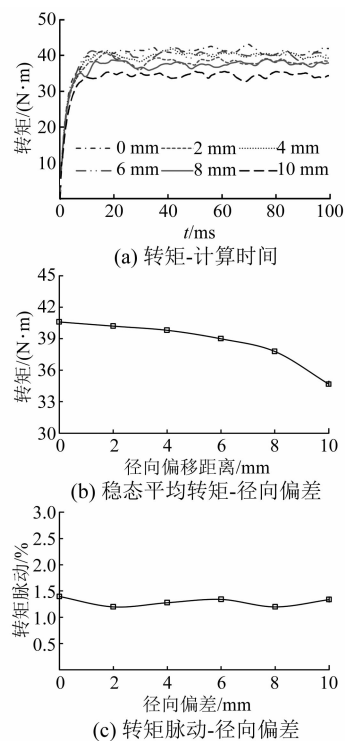


图 12 转矩随径向偏差的变化情况

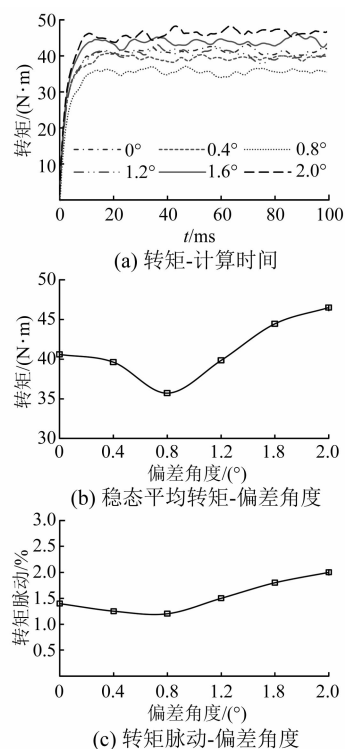


图 13 不同角向偏差下 MC 转矩特性

3 结 语

本文通过理论偏差模型和三维有限元方法针

对 MC 的轴系偏差问题和补偿特性进行了深入的研究。结论如下:随着径向偏差距离的增加,气隙磁场和导体盘涡流分布整体沿轴心径向移动方向偏移,MC 转矩总体呈下降趋势;随着角向偏差的增加,气隙磁场和涡流密度呈非对称分布,且出现明显的不平衡轴向磁拉力,但是输出转矩先下降然后平稳上升。轴系偏差对转矩脉动的影响不大,转矩脉动在 2% 以下,且角向偏差对转矩脉动影响大于径向偏差的情况。

【参考文献】

- [1] LUBIN T, REZZOUG A. 3-D analytical model for axial-flux eddy-current couplings and brakes under steady-state conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 8203712.
- [2] YANG X W, LIU Y G, WANG L. Nonlinear modeling of transmission performance for permanent magnet eddy current coupler [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 2098725.
- [3] ZHANG H X, WANG D Z, WANG X Y, et al. Equivalent circuit model of eddy current device [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (5): 8001009.
- [4] ZHU J H. Experimental research on energy-saving application of permanent magnet speed regulation technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 694: 242.
- [5] 吴明, 马玉顺, 匡俊, 等. 盘式永磁调速器在离心负载下的调速性能 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (14): 225.
- [6] 杨超君, 袁爱仁, 陈子清, 等. 盘式实心异步磁力耦合器的机械特性与调速特性 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 110.
- [7] CANOVA A, VUSINI B. Analytical modeling of rotating eddy-current couplers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 24.
- [8] WANG J, LIN H, FANG S, et al. A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 50(1): 8000109.
- [9] MOHAMMADI S, MIRSALEM M, VAEZ-ZADEH S. Nonlinear modeling of eddy-current couplers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (1): 224.
- [10] LI Z, WANG D Z, ZHENG D, et al. Analytical modeling and analysis of magnetic field and torque for novel axial flux eddy current couplers with PM excitation [J]. AIP Advances, 2017, 7(10): 105303.
- [11] CANOVA A, FRESCHI F. Multiobjective design optimization and Pareto front analysis of a radial eddy current coupler [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 32(4): 219.
- [12] 李全文. 新型耐高温涡流式双层实心转子磁力联轴器的设计与优化 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [13] 崔箫. 永磁调速器的设计及相关性能分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [14] ZHU Z N, LAI L J, PAN Y. Optimal design of permanent magnetic coupling with high torque transmission and low eddy-current loss [C] // 2017 2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering, 2017.
- [15] WALLACE A, WOHLGEMUTH C, LAMB K. A high efficiency, alignment and vibration tolerant, coupler using high energy-product permanent magnets [C] // Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives, 1995.

(上接第 42 页)

- [9] 万健如, 林志强, 禹华军. 高频 PWM 脉冲波传输引起电机端子过电压的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 43.
- [10] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393.
- [11] 汤蕴璆. 电机学 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.