

飞轮储能用混合磁悬浮轴承温度场分析*

孙玉坤, 郭帅坡, 杨帆

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 磁悬浮轴承 (MBs) 作为飞轮系统的重要组成部分, 工作在真空环境, 然而散热条件差, 温度过高严重影响了飞轮的运行, 降低了飞轮的可靠性。在对飞轮储能用混合型磁悬浮轴承损耗进行分析的基础上, 利用 ANSYS 有限元软件建立混合型磁轴承的 3D 热模型, 将不同运行状态下磁悬浮轴承的损耗作为热源导入温度场中, 得到了磁悬浮轴承在不同运行状态下的温度分布, 为磁悬浮轴承的设计和温升控制提供了重要的依据。

关键词: 飞轮储能; 混合磁悬浮轴承; 损耗; 温度场

中图分类号: TH 133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)08-0076-06

Temperature Field Analysis of Hybrid Magnetic Bearings for Flywheel Energy Storage*

SUN Yukun, GUO Shuaipo, YANG Fan

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: As an important part of the flywheel system, magnetic bearings (MBs) worked in a vacuum environment with poor heat dissipation and high temperature, which would seriously affect the operation and reliability of the flywheel system. The loss of hybrid magnetic bearing (HMB) for flywheel energy storage was analyzed. Based on this, the 3D thermal model of HMB was established by using ANSYS finite element software. The losses of the MBs under different operating conditions were introduced into the temperature field as heat source. The temperature distribution of the MBs under different operating conditions was obtained, which provided an important basis for the design and temperature rise control of the MBs.

Key words: flywheel energy storage; hybrid magnetic bearing (HMB); loss; temperature field

0 引言

磁悬浮轴承是利用非接触式磁力的作用将转子稳定悬浮起来的新型支撑技术, 具有无机械接触、无摩擦、无需润滑、寿命长等优点^[1-3]。在卫星姿态控制、飞轮储能^[4-5]、航空航天、高速高精度机床以及真空超净等领域得到了广泛应用^[6]。与传统轴承相比, 磁悬浮轴承具有众多的优点, 但是其发热是一个不可忽视的问题, 尤其是对于采用磁悬浮轴承支撑的飞轮系统, 工作环境为高真

空, 散热条件较差, 由损耗产生的发热将会影响飞轮的正常运行。因此, 在设计磁悬浮轴承时有必要对其损耗和温度场进行分析。

国内外许多学者对磁悬浮轴承的损耗和温度场进行了相关的研究。Meeker 等^[7]对转子的旋转损耗进行研究, 提出了包含磁滞损耗和涡流损耗在内的解析解, 并通过试验验证了准确性。文献^[8]对主动磁轴承和混合径向磁悬浮轴承进行研究, 结果表明相同转速下混合磁悬浮轴承损耗小于主动磁悬浮轴承损耗。文献^[9]提出了一种

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51707082, 51877101); 江苏省自然科学基金项目 (BK20170546); 中国博士后科学基金项目 (2017M620192)

作者简介: 孙玉坤 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电力传动的智能控制。

郭帅坡 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁悬浮开关磁阻电机。

基于磁阻网络法计算主动磁悬浮轴承损耗的分析方法,能够快速估计磁悬浮轴承的损耗,减少了开发时间和工作量。文献[10]利用 ANSYS 有限元分析软件,在考虑热对流和热传导的基础上分析了径向磁悬浮轴承的温度分布。并利用红外热成像仪测量了径向磁悬浮轴承的温度场分布,试验测值与分析所得温度值基本相符。文献[11]提出了一种考虑电磁耦合和温度耦合的损耗和温度场计算方法,并研制了 2 台以 MB 系统为支撑系统,以功率为 30 kW、转速为 36 000 r/min 的电机进行试验,试验结果验证了该方法的有效性和准确性。上述文献对磁悬浮轴承温度的分析并没有考虑工作环境和运行状态。

本文针对飞轮系统用混合磁悬浮轴承进行了研究。首先对其损耗进行分析,得到了磁悬浮轴承的损耗分布;然后采用磁-热耦合的方式建立了混合磁悬浮轴承的 3D 热模型,并给该模型添加了相应的边界条件;最后将磁悬浮轴承不同运行状态下的损耗作为热源导入温度场中,得到不同运行状态下的磁悬浮轴承温度分布,为磁悬浮轴承的设计提供了重要的理论依据。

1 混合型径向磁悬浮轴承损耗分析

混合型径向磁悬浮轴承采用永磁体来提供偏置磁通,有效地减小了励磁损耗。其损耗主要有:铁耗、铜耗、永磁体涡流损耗和附加损耗等^[8,12-14]。本文主要考虑铜耗、铁耗和永磁体的涡流损耗。

1.1 铜耗

混合磁悬浮轴承的铜耗是磁悬浮轴承受到外界扰动时,由控制电流流经绕组电阻引起的。根据欧姆定律,可得铜耗的计算公式为

$$P_{Cu} = i^2 R = i^2 N \frac{\rho_{Cu} l}{A_{Cu}} \quad (1)$$

式中: P_{Cu} ——铜损耗;

i ——控制线圈中的流过的电流;

R ——线圈的总电阻;

N ——线圈的总匝数;

ρ_{Cu} ——铜线的电阻率;

A_{Cu} ——铜线的横截面积;

l ——单匝线圈的平均长度。

对于纯主动磁悬浮轴承铜耗电流为偏置电流

和控制电流的和,而对于混合型磁悬浮轴承而言,偏置磁通是由永磁体提供的,因此计算铜耗时电流只有控制电流。

1.2 铁耗

磁悬浮轴承中的铁耗主要包括定子上的铁耗和转子上的铁耗。其中转子上的铁耗主要是涡流损耗,由铁心部件中的磁通密度 B 变化引起。定子上的铁耗是由控制电流的变化引起磁通密度 B 的变化而导致的。当磁悬浮轴承处于稳定悬浮状态时,控制电流为零,磁通密度 B 基本不变,铁耗非常小。磁悬浮轴承的铁心损耗分为涡流损耗和磁滞损耗,表达式为

$$P_{Fe} = P_e + P_h = \frac{1}{6\rho} \pi^2 e^2 f_r^2 B_m^2 V_{Fe} \gamma_{Fe} + k_h f_r B_m^{1.6} V_{Fe} \gamma_{Fe} \quad (2)$$

式中: P_{Fe} ——磁悬浮轴承的铁心损耗;

P_e ——涡流损耗;

P_h ——磁滞损耗;

ρ ——铁心的单位电阻;

e ——硅钢片的叠片厚度;

f_r ——气隙中磁场的再磁化频率;

B_m ——交变磁感应强度的幅值;

V_{Fe} ——铁心的体积;

γ_{Fe} ——铁心材料的密度;

k_h ——磁滞损耗系数。

混合型磁悬浮轴承磁极排列方式为 NSNSNSNS。当磁轴承在旋转一周的过程中转子被反复磁化 4 次,再磁化频率为旋转频率的 4 倍^[11]。因此,再磁化频率为

$$f_r = 4 \times f_0 \quad (3)$$

式中: f_0 ——转子的旋转频率。

1.3 永磁体涡流损耗

混合型磁悬浮轴承定子永磁体产生的涡流损耗主要是由气隙磁场中的大量谐波与控制电流变化引起的大量时间谐波而导致的。磁悬浮轴承稳定悬浮状态下,永磁体产生的涡流损耗较小。永磁体涡流损耗表达式为

$$P_{eddy} = \int_V E \cdot J dV = \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV \quad (4)$$

式中: E ——涡流电场强度;

J ——涡流密度;

σ ——永磁体的电导率;

V ——永磁体的体积。

本文所研究的混合型径向磁悬浮轴承结构参数如表 1 所示。

表 1 混合型径向磁悬浮轴承结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	55	线圈匝数	40
定子内径/mm	46	轴向长度/mm	40
转子外径/mm	28	永磁体厚度/mm	2

2 混合型磁悬浮轴承热分析模型

2.1 热模型

本文采用电磁-热单向耦合的方式来对磁悬浮轴承进行温度场分析。首先要建立磁悬浮轴承的热模型,混合型磁悬浮轴承由定子、转子和线圈组成。在建立热模型时,为了简化模型需要考虑以下几点。

(1) 磁悬浮轴承所在的环境温度要保持不变,初始温度和材料的温度要与环境温度保持一致。

(2) 磁悬浮轴承的转子产生的热量大部分经定子热传导和对流散热散布出去,因此在进行温度场仿真时要把定子部分的温度影响等效为一定的环境温度。

(3) 将磁悬浮轴承的绕组等效为一个导热体来处理,对绕组进行等效时应保证等效前后绕组的体积不变,定子槽内的所有绝缘同槽绝缘,等效为一个导热体。

(4) 定子外表面和定转子端面的散热系数取平均值。

基于上述分析,本文建立的等效混合磁悬浮轴承的 3D 有限元热分析模型如图 1 所示。将绕组等效为一个导热体,绕组铜线漆膜、浸渍漆和槽绝缘等效为另一个导热体,定子与转子之间的间隙等效为一个圆柱形导热体。

2.2 边界条件和热参数

热量的传递是一种自然界中的能量传递过程,一般是因为各个物体之间存在温度差,热量从温度高的物体传递到温度低的物体直到两者之间的温度达到平衡。依据传热学基本理论,热传递基本包含 3 种方式:热传导、热对流与热辐射^[15-16]。

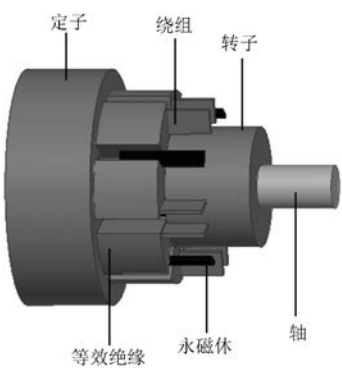


图 1 等效热模型

物体之间不发生相对位移,通过微观粒子的热运动所引起的热量传递过程称为热传导,是热量的主要传递方式。表达式为

$$Q = - \lambda S \frac{dT}{dn} \tag{5}$$

式中: Q ——热流量;
 λ ——材料导热系数;
 S ——材料的传热面积;
 $\frac{dT}{dn}$ ——温度梯度。

温度较高的流体和温度较低的流体之间存在相对运动,由于相对位移和温度差存在所产生的传热现象叫做热对流。表达式为

$$Q = hS(t_s - t_r) \tag{6}$$

式中: h ——对流散热系数;
 t_s ——材料表面温度;
 t_r ——流体温度。

对流散热系数表征物体不同形态下的散热能力,受许多因素影响,如物体比热容、流体流速与散热面形状等^[17]。

以电磁波的形式来进行热量传递的过程称为热辐射。表达式如下:

$$\Phi_{1,2} = \frac{\sigma_b(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \tag{7}$$

式中: $\Phi_{1,2}$ ——辐射面 1 和 2 间的传热量;
 σ_b ——黑体辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8}$;
 T_1, T_2 ——辐射面 1 和 2 的温度^[18];
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ——辐射面的发射率,取值在 0~1 之间;

$A_1、A_2$ ——辐射面的表面积;
 $X_{1,2}$ ——辐射面 1 和 2 的角系数。

对于飞轮储能用混合磁悬浮轴承而言,由于工作环境恶劣,空气稀少,只能通过热辐射进行散热,热传导和热对流散热完全可以忽略。假设混合磁悬浮轴承各组件材料的导热系数不随温度变化,混合型磁悬浮轴承绕组由多股漆包铜线绕制而成。为了简化计算,将其等效为一个导热体,等效导热系数计算如下:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{Cu} F_{ew} + \lambda_{imp} (1 - F_{ew}) \tag{8}$$

式中: λ_{Cu} ——铜的导热系数;
 λ_{imp} ——绝缘材料的导热系数;
 F_{ew} ——槽满率。

通过计算得到各部分材料的导热系数如表 2 所示。

表 2 各部分材料的导热系数

轴承 组件	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容 /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
定转子	7 800	465	52.000
绝缘材料	1 700	1 340	0.326
绕组	8 900	390	380.000
转轴	7 700	480	50.200
永磁体	8 300	540	10.000

3 仿真结果分析

本文采用 ANSYS Workbench 对磁悬浮轴承进行磁-热耦合瞬态分析,在仅考虑各组件之间热传导和热辐射的情况下,建立有限元仿真模型。通过电磁分析与计算得到磁轴承的损耗分布,将损耗作为热源加载到瞬态温度场中得到磁悬浮轴承各组件的温度分布。

图 2 所示为磁悬浮轴承在仅提供偏置磁通情况下的各组件温度分布图。由图 2 可知,磁悬浮轴承的定子比转子温度低,原因是磁悬浮轴承的定子稳定悬浮时产生的损耗非常小,且外表面和飞轮的外壳相连靠近外部环境,散热面积较大,散热条件较好。定子控制磁极的温度比永磁磁极的温度低,是由永磁体产生的涡流损耗导致的。磁悬浮轴承转子处于稳定悬浮状态时,因为转速较高,磁通密度 B 变化感应出的涡流损耗较大,且磁悬浮轴承的转子处于真空环境中,空气稀薄,

只能通过热辐射进行散热,散热条件较差,所以转子温度较高。

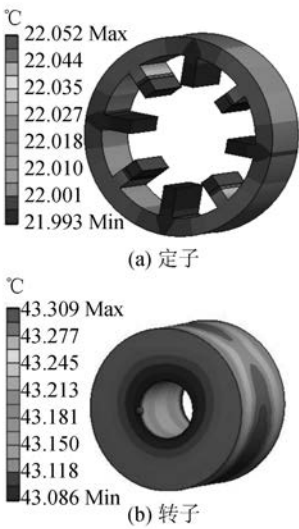


图 2 仅有偏置磁通时各组件温度分布

图 3 所示为磁悬浮轴承各部件的温度变化曲线。

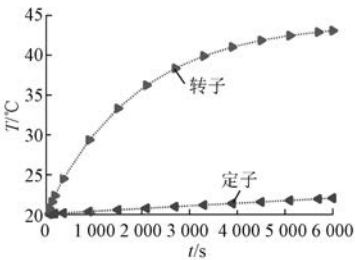


图 3 各部件温度变化曲线

由图 3 可知,磁悬浮轴承在刚开始运行时温度上升的速度较快。这是由于初始运行时,磁悬浮轴承温度与外部环境温度相差不大,磁悬浮轴承损耗产生的热量用于加热自身,对外部环境散热量较小;运行一段时间后磁悬浮轴承温度与外部环境温度相差较大,定子开始通过热传导和热辐射向外散热,转子通过热辐射进行散热,轴承的温度缓慢升高。80 min 后各部件散热量与产生的热量达到平衡,温度逐渐趋于稳定。

当转子受到外界扰动时,磁悬浮轴承的转子发生偏移,此时控制线圈中通入相应的控制电流,产生相应的悬浮力使转子稳定悬浮在平衡位置。控制线圈中通入控制电流产生大量的铜耗,导致磁轴承的温度上升。图 4 所示为磁悬浮轴承沿 Y

轴方向通入最大控制电流时的温度分布。从图 4 可以看出,通入控制电流后磁悬浮轴承绕组温度最高,约为 $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。定子侧的温度约为 $68\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度最高的部位在通入控制电流的定子齿上。这是由于绕组产生的热量通过热传导与定子齿进行传热,所以定子齿上的温度升高。转子的温度低于定子的温度,约为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为转子处于真空状态,只能通过热辐射进行散热,散热环境较差,所以其温差很小。

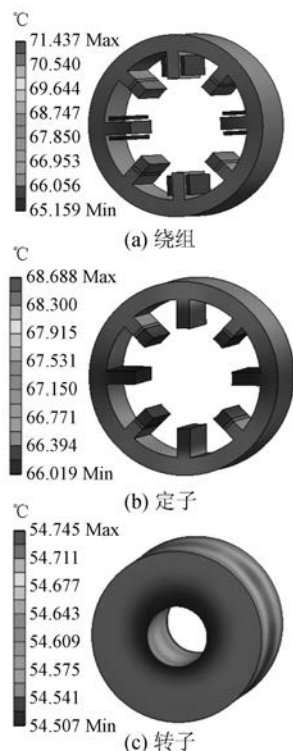


图 4 沿 Y 轴方向通入最大控制电流时的温度分布

飞轮储能系统一般工作在高速运行状态,转速较高。随着转速的升高,磁悬浮轴承转子铁心中由磁通密度 B 变化引起的涡流损耗将增大,导致转子的温度上升。图 5 所示为不同转速下磁悬浮轴承转子的温度分布。从图 5 可以看出,随着转速的增大,转子的温度不断上升。当转速为 $10\ 000\text{ r/min}$ 时,转子的温度约为 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$; 转速为 $30\ 000\text{ r/min}$ 时,转子的温度约为 $127\text{ }^{\circ}\text{C}$; 当转速为 $40\ 000\text{ r/min}$ 时,转子的温度约为 $162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于磁悬浮轴承转子处于真空环境,散热条件差,温度的上升严重影响了飞轮系统的高速运行。磁悬浮轴承转子在装配时是黏结的,当转子部位受热产生热膨胀后将导致使

磁钢断裂。因此,有必要寻求有效的方法降低混合磁悬浮轴承转子部位的温度。因为热辐射为磁悬浮飞轮工作过程中的主要散热方式,所以可通过对材料进行表面处理提高热辐射率,以改善飞轮转子组件的传热。此外,转子铁心使用更薄的叠片可以进一步降低转子的涡流损耗,从而降低转子在高速运行时的发热。

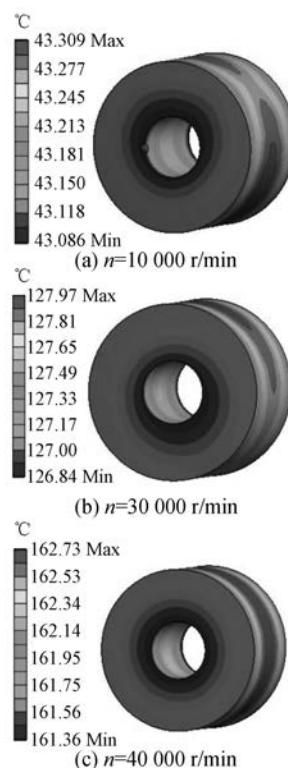


图 5 不同转速下转子的温度分布

4 结 语

本文以飞轮储能用混合磁悬浮轴承为研究对象,利用有限元软件 ANSYS Workbench 对不同运行状态下的温度场进行了分析。从分析结果可以得出结论:混合型磁悬浮轴承在高速运行状态时铁耗主要分布于转子部分,转子温度明显高于定子温度。随着磁悬浮轴承转速的升高,转子铁心损耗增大,温度升高。对于磁悬浮轴承的定子,在稳定运行时产生的损耗较小,且散热条件比转子好,因此温度较低。对飞轮储能用磁悬浮轴承进行温度场分析,为飞轮系统的设计提供了重要的依据,对整个系统的热设计及总体设计具有重要意义。

【参考文献】

- [1] HUANG Z, FANG J, LIU X, et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2027.
- [2] LI Y, LI W, LU Y. Computer-aided simulation analysis of a novel structure hybrid magnetic bearing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(10): 2283.
- [3] 袁野, 孙玉坤, 张维煜, 等. 新型飞轮储能备用轴承磁力数值分析[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(7): 95.
- [4] HAN B, ZHENG S, WANG X, et al. Integral design and analysis of passive magnetic bearing and active radial magnetic bearing for agile satellite application [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(6): 1959.
- [5] NGUYEN T D, FOO G. Sensorless control of a dual-airgap axial flux permanent magnet machine for flywheel energy storage system [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(2): 140.
- [6] HAN B, ZHENG S, LE Y, et al. Modeling and analysis of coupling performance between passive magnetic bearing and hybrid magnetic radial bearing for magnetically suspended flywheel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(10): 5356.
- [7] MEEKER D C, FILATOV A V, MASLEN E H. Effect of magnetic hysteresis on rotational losses in heteropolar magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(5): 3302.
- [8] BAKAY L, DUBOIS M, VIAROUGE P, et al. Losses in hybrid and active magnetic bearings applied to long term flywheel energy storage [C] // 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 2010.
- [9] ROMANENKO A, SMIRNOV A, JASTRZEBSKI R P, et al. Losses estimation and modelling in active magnetic bearings [C] // 2014 16th European Conference on Power Electronics & Applications, 2014.
- [10] 辛露, 吴华春. 径向磁力轴承的温度场分析与计算 [J]. 机械制造, 2011, 49(6): 18.
- [11] REN X, LE Y, HAN B, et al. Loss and thermal estimation method of a magnetic bearing system considering electromagnetic and temperature coupling [C] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017.
- [12] SHELKE S, CHALAM R V. Optimum energy loss in electro magnetic bearing [C] // 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, 2011.
- [13] BAKAY L, DUBOIS M, VIAROUGE P, et al. Losses in an optimized 8-pole radial AMB for long term flywheel energy storage [C] // 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
- [14] ROMANENKO A, SMIRNOV A, JASTRZEBSKI R P, et al. Losses estimation and modelling in active magnetic bearings [C] // 2014 16th European Conference on Power Electronics & Applications, 2014.
- [15] KWON O. Analysis and experiment on the thermal characteristics of electric motors [D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [16] REN X, LE Y, HAN B. System electromagnetic loss analysis and temperature field estimate of a magnetically suspended motor [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017, 55: 51.
- [17] JIANG W, JAHNS T M. Coupled electromagnetic-thermal analysis of electric machines including transient operation based on finite-element techniques [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1880.
- [18] 赵镇南. 传热学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.

收稿日期: 2019-04-25