

考虑转子内部温度梯度的磁-热耦合分析

闫旭

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:当磁悬浮转子内部存在温度梯度时,转子会发生变形从而对整个磁悬浮轴承系统的可靠性及动态性能有显著的影响。为了准确计算磁悬浮转子内部温度差异分布,提出了一种磁-热耦合(2D-3D)方法对磁悬浮转子进行热分析。通过电磁分析软件 Ansoft Maxwell 对交变磁通下磁悬浮轴承铁损耗进行二维有限元分析,将铁损耗以空间坐标相对应的原则映射到 COMSOL 的三维温度场分析中,其他损耗如铜损耗也包含在模型中。将这种方法应用在某型号磁悬浮轴承系统上,通过实验分析,计算结果与测量结果相吻合。

关键词:磁悬浮转子;损耗;温度梯度;磁-热耦合;有限元

中图分类号 TH136; 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)05-0071-05

Magnetic-thermal Coupling Analysis in Consideration of Temperature Gradient inside Rotor

YAN Xu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: When a temperature gradient exists inside the magnetic suspension rotor, the deformation of the rotor can occur, which has a significant impact on the reliability and dynamic performance of the whole magnetic suspension bearing system. To accurately calculate the temperature distribution inside the magnetic suspension rotor, a magnetic-thermal coupling (2D-3D) method is proposed, which is used to do its thermal analysis. The two-dimensional finite element analysis of iron loss of magnetic bearing under alternating flux is carried out by the electromagnetic analysis software Ansoft Maxwell. The iron loss is mapped into the three-dimensional temperature field analysis of COMSOL according to the principle of space coordinates. Other losses, such as copper loss, are also included in the model. The method is applied to a certain type of magnetic bearing system, and the calculated results are in good agreement with the measured ones through the experimental analysis.

Keywords: magnetic suspension rotor; loss; temperature gradient; magnetic-thermal coupling; finite element method

0 引言

磁悬浮轴承是一种通过主动控制电磁力大小,实现转子悬浮的新型高性能轴承,与传统的机械轴承相比具有无机械接触、无摩擦、长寿命、免润滑、高效率、低噪声、可主动控制等优点,在高速旋转机械领域有着广泛的应用前景^[1-3]。虽然磁悬浮轴承能使转速达到传统轴承无法达到的高度,但也不可避免地存在损耗问题。由于磁悬浮系统的磁悬浮转子处在磁场强度大小不均匀的磁场中,根据铁芯材料的磁化特性可知,转子内部会产生分布不均匀的铁损耗,使磁悬浮转子内部温度存在温度差。另外,温度梯度的存在会使转子产生热弯曲变形,热弯曲产生的热不平衡扰动力加剧转子的振动,制约着整个磁悬浮轴承系统的可靠性及动态性能^[4]。因此,必须深入地研究磁悬浮转子内部温度分布规律。

热分析是磁悬浮轴承-转子系统设计的一个重要方

面。常用的分析方法有热网络法和有限元法。因为振动控制的作用下,磁悬浮转子内部损耗的分布不均匀,想要获得磁悬浮转子内部准确的温度分布必须采用有限元法。磁-热耦合分析可以分为直接耦合或者顺序耦合:直接耦合是采用一个耦合方程一次性求解出磁场和热场,该方法适用于高度非线性的耦合问题;顺序耦合则是分两步进行,先求解磁场再求解热场,该方法更为灵活有效,可以分别控制磁场、热场的求解精度和迭代次数。文献[5]采用热网络法对实心磁铁推力磁悬浮轴承的温升进行分析,但计算值与实验结果存在较大的偏差。文献[6]采用有限元法计算了磁悬浮电主轴的温度场,但是其热源是以生热率的形式进行仿真,没有考虑部件的温度分布差异。

本文针对磁悬浮转子内部温度差异分布,提出一种磁-热顺序耦合方法。磁场采用二维有限元方法计算,损耗结果以空间坐标相对应的原则映射到温度场中,并进行温度场的三维有限元计算。另外,本文还搭建了一套实验平台,最后将有限元结果与实验数据进行对比分析。

基金项目:国家自然科学基金项目(51875275);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20180515)

作者简介:闫旭(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮技术。

1 径向磁悬浮轴承损耗的研究

1.1 铁损耗分析的有限元模型及参数设置

对于磁悬浮轴承的铁损,由于其结构具有一定的复杂性,相比较于传统的数学解析法,采用有限元方法计算能得到更精确的结果。本节采用工程电磁场仿真软件 Ansoft Maxwell 对径向磁悬浮轴承在交变磁通下的铁损进行计算与分析。主动式磁悬浮轴承中的定子与转子均采用叠片结构,根据其结构特性,选择其二维简化模型进行铁损仿真,不仅能节省计算成本,计算准确度也完全能够满足工程要求。

采用 Maxwell 对径向磁悬浮轴承在交变磁通下的铁损进行计算时,需要设置以下主要参数:

1) 电磁场仿真分析的类型和模型尺寸的设置。计算交变磁通下的铁损耗时,需要设置二维瞬态场分析;模型尺寸取实验室现有的磁悬浮轴承的参数,如表 1 所示。根据结构尺寸参数,建立电磁场有限元仿真模型如图 1 所示。

2) 材料属性的设置。本课题组实验台的磁悬浮定、转子均为 20WTG1500 硅钢片,将其材料参数导入有限元软件中。

3) 边界条件和激励的设置。对径向磁悬浮轴承的一组线圈施加同频率的正弦电流激励,转子保持静止,此时磁悬浮轴承处于交变磁通下。模型外边界设置为零磁通边界(忽略漏磁的影响)。

4) 网格划分设置。由损耗理论可知,铁损耗主要集中在转子表层和定子磁极处,适当对这些区域加密,可以保证有限元结果更准确。

5) 求解器设置。合理分配仿真步长,当高频激励时,时间步长要小一些,反之,时间步长适当增加。

表 1 磁悬浮轴承的主要参数

参数名称	参数值
定子外径 D_0/m	170×10^{-3}
转子外径 D_1/m	65×10^{-3}
芯轴外径 D_2/m	34×10^{-3}
磁轭宽度 c/m	20×10^{-3}
磁极极柱高度 h/m	32.25×10^{-3}
磁极极柱宽度 t/m	15×10^{-3}
角度 $a/(\circ)$	22.5
单边气隙 s/m	0.25×10^{-3}
铁芯叠片厚度 m	26×10^{-3}

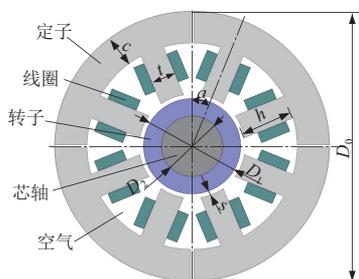
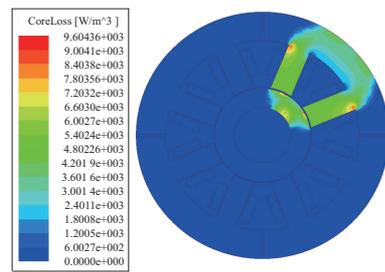


图 1 电磁场有限元仿真模型的结构示意图

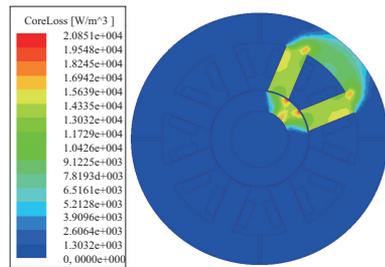
1.2 铁损耗仿真

为了验证本文提出的磁-热耦合方法的准确性。设计了 4 组不同的电流工况,即:交变电流幅值分别为 0.25 A、0.5 A、0.75 A、1 A。

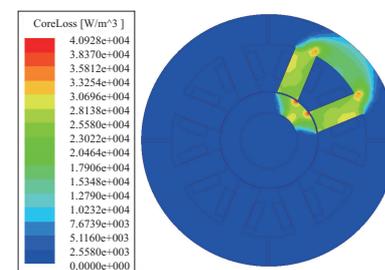
本节仿真了 4 种不同电流工况下的径向磁悬浮轴承的铁损情况,每一种工况下,对一组线圈通入电流,进行交变磁通下的仿真研究。经过径向磁悬浮轴承铁损分析后,使用软件的后处理功能获取铁损云图,如图 2 所示。由图可知,铁损在定、转子上是不均匀分布的。如果取总铁损值计算体积生热率作为热载荷进行温度场的仿真,得到的温度结果不够精确。因此,本文提出将铁损值与空间坐标相对应的原则,提取并导入到 COMSOL 中作为热源进行温度场分析。



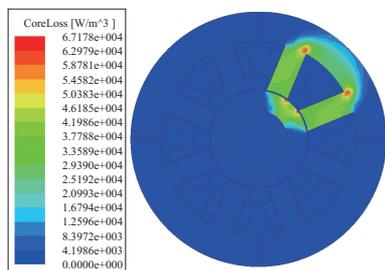
(a) 铁损耗分布云图 (交变电流幅值 0.25 A)



(b) 铁损耗分布云图 (交变电流幅值 0.5 A)



(c) 铁损耗分布云图 (交变电流幅值 0.75 A)



(d) 铁损耗分布云图 (交变电流幅值 1.0 A)

图 2 径向磁悬浮轴承的铁损耗分布图

1.3 铜损耗

铜损耗是指由线圈的导线电阻产生的损耗,是磁悬浮轴承温度场分析时不可忽略的部分。当线圈通入电流时,无论磁悬浮轴承处于空载或者承载时,都会产生铜损耗。铜损耗的计算公式如下^[7]:

$$P_{cu} = I^2 R = I^2 \rho L / S \quad (1)$$

式中: P_{cu} 为铜损耗,W; L 为导线的长度,m; ρ 为导线的电阻率; S 为导线的横截面积, m^2 ; I 为电流有效值,A。

由式(1)可知:1)导线的长度越大,铜损耗就越大;2)导线的横截面积越小,线圈产生的铜损耗越大;3)随着电流有效值增大,铜损耗越大。

本文研究的线圈是由圆柱形的铜导线组成,并环绕在磁极极柱上。其结构参数如表2所示。当线圈的结构参数一定时,其电阻值保持不变。在径向磁悬浮轴承系统中,线圈中的电流包括交变电流和一个直流偏置。其中,本文中涉及的直流偏置均取值为1.7A。将各参数带入式(1)中计算4种工况下的铜损,结果如图3所示。由图可知,铜损耗随交变电流幅值的增大而增大。最后,将计算所得的铜损,转换成体积生热率,代入相对应的工况下进行温度场仿真。

表2 导线的主要参数

参数名称	参数值
铜导线电阻率 $\rho / (\Omega \cdot m)$	1.75×10^{-8}
铜导线直径 D / m	1×10^{-3}
线圈匝数	160
铜导线总长度 L / m	15.2

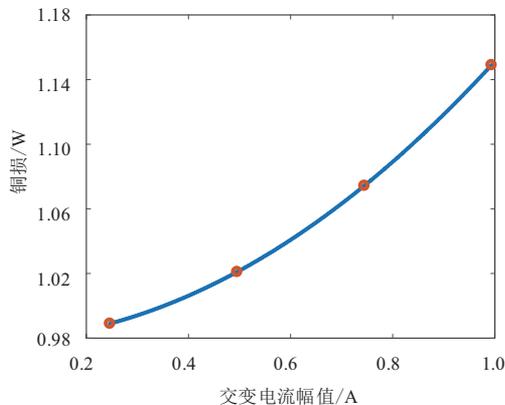


图3 铜损耗与交变电流幅值的关系

2 径向磁悬浮轴承温度场的有限元仿真研究

2.1 温度场分析的有限元模型及参数设置

为了验证磁悬浮轴承系统在正常旋转过程中的温升情况,采用类比原理,即通过在静止工况下,以磁悬浮转子

温度实验结果验证本文提出的仿真方法的仿真结果,侧面证明本文提出的磁-热耦合分析法同样适用于磁悬浮转子的旋转工况。

磁-热耦合分析法是将磁场的损耗作为热源加载到温度场。根据上节磁场损耗的分析结果,选择相对应的4种工况,进行温度场仿真分析。探究转子组件上的温度高低与分布情况。

本文以实验室中现有的转子组件为基础进行三维建模。由于后文的实验只对一组线圈通入电流,因此,三维温度场仿真模型建立如图4所示。

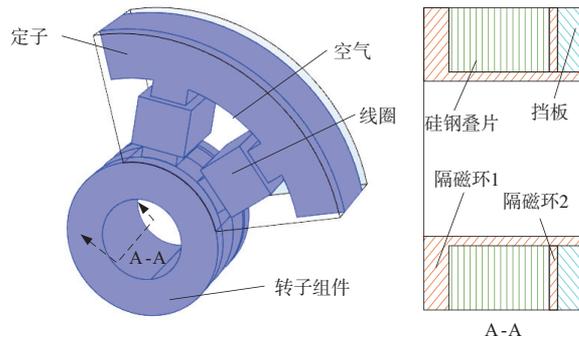


图4 径向磁悬浮轴承的三维模型

采用COMSOL对径向磁悬浮轴承在交变磁通下的温升进行计算时,需要设置以下主要参数:

1) 热源的设置。在常用的热场有限元分析中,热载荷通常以体积生热率的方式施加在实体上。而在本文的热场分析中,通过从磁场计算得到的各单元铁损耗,以空间坐标相对应的原则,映射到对应的位置上,而铜损耗转换成体积生热率加载到线圈的模型上。

2) 散热边界条件的设置。定转子中硅钢叠片部分在交变磁通下产生损耗,由于材料本身具有导热性能,热量在固体内部进行传导,然后,相互接触的实体也进行能量的传递。最后,当热量传递到定、转子组件表面处,此时与周围空气之间的换热包含了对流换热和辐射换热,因此取复合换热系数进行等效^[8]。具体的温度场仿真的热边界参数的取值如表3所示。

3) 材料属性的设置及网格划分。根据实际磁悬浮轴承系统中的材料,将其材料属性参数导入到温度场分析中,具体数值如表4所示。温度场仿真中的网格划分采用超细化的单元大小。其中,定、转子之间气隙处的网格进一步细化处理。此时,计算精度完全满足工程要求。

4) 求解器设置。合理地分配时间步长,满足计算精度下,减少仿真计算时间。

表3 径向磁悬浮轴承热边界条件参数

边界条件	数值
环境初始温度/K	301.55
定、转子组件表面与周围空气的复合换热系数/ $(W / (m^2 \cdot K))$	25
线圈与周围空气的复合换热系数/ $(W / (m^2 \cdot K))$	25

表 4 径向磁悬浮轴承的零部件材料参数

零部件	材料	常压热熔/ (J/(kg·k))	导热系数/ (W/(m·k))	密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/ Pa
硅钢叠片	20WTG1500	460	各向异性	7 560	0.3	—
隔磁环	不锈钢 304	500	16	7 930	0.29	1.94×10 ¹¹
线圈	铜	390	110	8 690	0.34	1.25×10 ¹¹
挡板	电工纯铁	440	14	7 850	0.3	2.08×10 ¹¹

2.2 温度场仿真的结果

随着时间的推移,生热与散热逐渐达到热平衡,此时转子组件各部件温度趋于稳定,转子组件的稳态温度分布云图如图 5 所示。由图可知,本文提出的磁-热耦合分析方法能够分析出转子组件内部的温度差异情况,而工程实践中常用的温度场分析方法,是将热载荷以体积生热率的方式

施加在实体有限元模型上,这种方法无法考虑到转子内部的温度差异分布。然而,本文仿真结果验证了所提出的磁-热耦合分析方法可以应用于需要考虑转子内部温度梯度的场合。另外,为了验证仿真结果的准确性,提取图 6 所示的位置 1、3 处的温度仿真值,计算两处的稳态温度差,结果如表 5 所示。将该仿真结果与后文中的实验测量温差结果进行了对比。

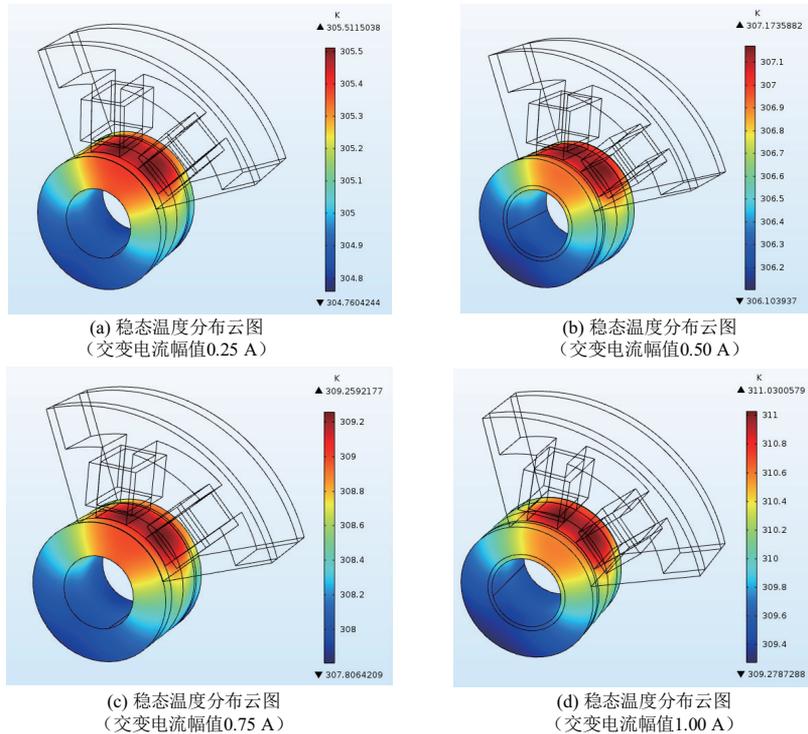
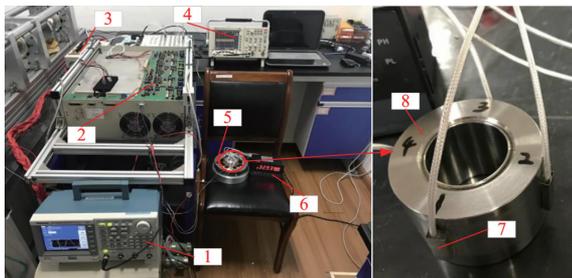


图 5 转子组件的稳态温度分布云图



1—信号发生器;2—磁悬浮系统控制箱;3—电流转接箱;
4—示波器;5—磁悬浮轴承-转子系统;6—温度巡检仪;
7—PT100 温度传感器;8—转子组件。

图 6 实验系统实物图

表 5 稳态时转子组件上的温度差

工况	位置 1 与位置 3 之间的温度差/K
交变电流幅值为 0.25 A	0.62
交变电流幅值为 0.50 A	0.89
交变电流幅值为 0.75 A	1.24
交变电流幅值为 1.00 A	1.48

3 实验分析

为了验证本文提出的磁-热耦合方法的准确性,搭建了

一套实验系统,实物如图6所示,其原理图如图7所示。首先,由信号发生器产生激励电压信号,经磁悬浮系统控制箱中的功率放大器后,转换成幅值可调的交变电流信号。其中,电流信号可通过电流探头和示波器进行观测。最后,电流经过转接箱后通入1号PT100温度传感器位置处的一组线圈中。交变的电流产生交变的磁场,而磁悬浮轴承-转子系统在交变的磁场下,会产生涡流损耗、磁滞损耗和杂散损耗等。另外,线圈发热产生铜损耗。各项损耗产生的热量会加热转子组件,使转子内部产生温度梯度。通过图6中的PT100温度传感器对转子组件表面的温度进行采集,温度巡检仪具有多个通道,可以将采集到的温度数据可视化。

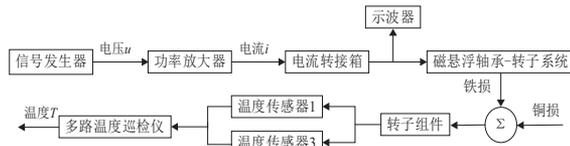


图7 实验系统原理图

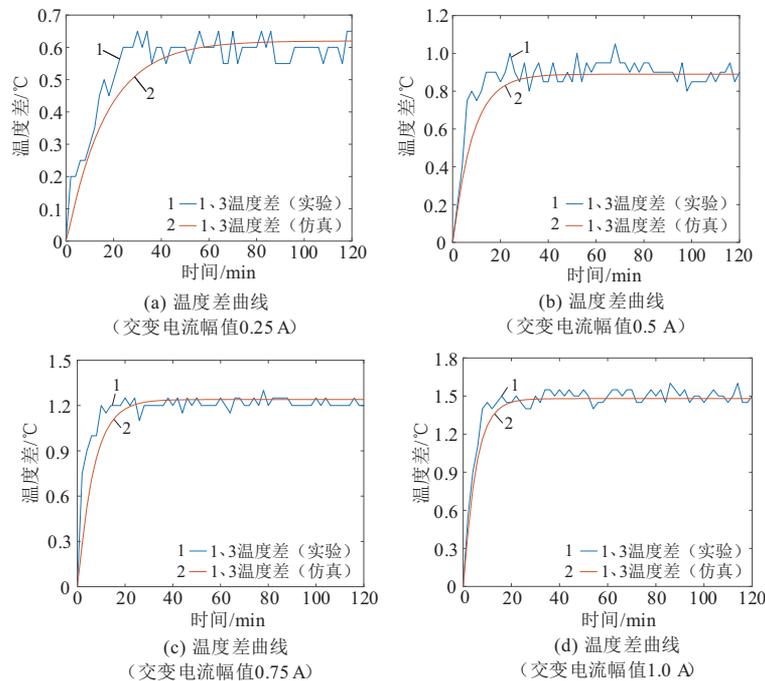


图8 仿真结果与实验结果对比图

4 结语

本文对磁悬浮转子内部的温升分布情况进行了深入的研究。通过二维磁场求解出定、转子的损耗后,以空间坐标相对应的原则映射到温度场的三维模型中。然后铜损耗以体积生热率的方式也包含在模型中。最后通过实验,验证了本文提出的磁-热耦合分析方法能够准确地分析出磁悬浮转子内部的温度分布情况。

参考文献:

- [1] HOU Ery-ong, LIU Kun. A novel structure for low-loss radial hybrid magnetic bearing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(12):4725-4733.
- [2] HANNES Bleuler, MATTHEW Cole, PATRICK Keogh, et al.

一方面,由于测量过程时间为2 h,温度采集过程中,周围环境温度的变化对实验数据具有很大的影响。因此,保持环境温度不变,对实验数据的真实性至关重要。在实验前,首先通过空调的调节作用,将室内的温度维持在某一恒定温度,且在实验过程中,室温保持不变。另一方面,由于PT100温度传感器个体之间的制造偏差,需要预实验,然后选择两个相同性能的PT100温度传感器贴在转子组件的被测表面。最后,对每一种电流工况,需要多次实验,避免实验数据的偶然性。

经过实验测量后,实验结果和仿真结果的对比,如图8所示。本文采用的是工业实践中最高精度的PT100温度传感器,其精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,实验数据具有一定的波动性。在数据记录时,取温度数据的平均值作为实验数据,从而降低实验误差。由图8可知,位置1与位置3处温度差的仿真结果能够和实验结果较好地吻合,验证了本文提出的磁-热耦合仿真方法能够准确分析出转子内部温度差异分布情况。

Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery[M]. New York: Springer, 2009.

- [3] 王骏. 磁悬浮转子振动信号分析及主动抑制[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
- [4] 孙兴伟,刘万涛,孙凤,等. 径向磁悬浮轴承的功耗分析[J]. 机械工程与自动化,2012(4):194-195.
- [5] 张亮. 磁悬浮电主轴温度场的仿真与实验[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
- [6] 孙首群,耿海鹏,虞烈. 实心磁铁推力磁轴承热分析[J]. 电工技术学报,2002(5):16-20.
- [7] 吴华春,胡业发. 磁悬浮磨削主轴热态特性[J]. 机械工程学报,2010,46(20):29-33.
- [8] 杨成玉. 永磁同步电主轴温度场计算分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.

收稿日期:2019-07-09