

文章编号:1671-6833(2015)03-0034-05

# 六环冗余轴向磁力轴承的热性能研究

王晓光, 谢 钧, 张 晓, 刘 倩, 付 靖

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 利用 ANSYS Workbench 对六环冗余轴向磁力轴承的温度场进行仿真计算,探讨了导致六环冗余轴向磁力轴承温升的原因,分析了磁路面积、磁环侧壁、转子转速等参数对六环冗余轴向磁力轴承温升的影响,给出了六环冗余轴向磁力轴承的结构设计和温升计算方法. 研究表明:六环冗余轴向磁力轴承的结构形式对转子的温升影响较大,磁路设计时应该避免导致转子旋转时的反复磁化;失效重构对六环冗余轴向磁力轴承的温升影响较小,可以忽略其影响;六环冗余轴向磁力轴承较原有的两环冗余轴向磁力轴承具有更高的可靠性、力学特性以及较好的热特性.

**关键词:** 轴向磁力轴承; 冗余; 温度场

**中图分类号:** TH133.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.008

## 0 引言

磁力轴承是一种高性能无机械接触的支承部件,其可靠性是航空发动机中磁力轴承的关键技术指标,而冗余设计是提高磁力轴承系统可靠性的重要方法. 磁力轴承在运行过程中的温升对系统的工作稳定性和可靠性影响较大. 因此,研究具有冗余能力的磁力轴承,要求我们既要研究其承载特性也要研究其热特性. 文献[1]对磁悬浮磨削主轴温度场分布及产生原因进行了试验、理论和仿真研究. 文献[2]对轴向电磁轴承的发热问题做了仿真计算,指出高频电流的幅值是影响电磁轴承发热最重要的参数. 文献[3]利用 ANSYS 对一种磁悬浮飞轮系统的转子组件进行了温度场仿真,分析了组件材料属性对温度场分布的影响,为磁悬浮飞轮系统的热设计及总体结构设计提供了依据. 可以看出,国内外学者对冗余磁力轴承的研究主要对象是径向磁力轴承,而对轴向磁力轴承的研究较少. 除了 A. F. Storace 曾于 1995 年提出的两环结构轴向磁力轴承冗余方案以外<sup>[4]</sup>,再没有提出新的方案,更没有冗余轴向磁力轴承的温升方面的研究.

笔者利用 ANSYS Workbench 对六环冗余轴向磁力轴承的温度场进行了分析:在满足六环冗

余轴向磁力轴承力学特性基础上,研究温升较小情况下的轴向磁力轴承的结构形式以及结构参数的选择;不同失效情况下冗余重构方式导致的温度场变化情况;转子转速对六环冗余轴向磁力轴承系统温升的影响.

## 1 六环冗余轴向磁力轴承热源分析

### 1.1 六环冗余轴向磁力轴承结构介绍

六环冗余轴向磁力轴承的结构见图 1. 它由定子、转子和线圈三部分组成,左右定子材料选用电工纯铁,每个定子有六个环形线圈腔. 由于结构需要,右定子厚度小于左定子厚度. 这种六环冗余轴向磁力轴承在承载力和冗余度方面都要优于普通的轴向磁力轴承和 A. F. Storace 提出的两环冗余轴向磁力轴承.

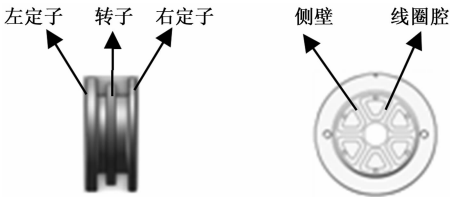


图 1 六环冗余轴向磁力轴承结构图

Fig. 1 The structure of six-ring redundant axial magnetic bearing

**收稿日期:**2015-01-18;**修订日期:**2015-03-04

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51205300;51147004)

**作者简介:**王晓光(1955-),男,河北肃宁人,武汉理工大学教授,博士,博士生导师,主要研究方向为机械制造及其自动化、机电一体化、磁悬浮理论与应用, E-mail: xgwang55@163.com.

## 1.2 轴向磁力轴承的热源分析和计算

磁力轴承的温度场模型为一定初始条件和边界条件下的热传导模型. 轴向磁力轴承的热特性分析主要是计算轴向磁力轴承的热源、生热率、温度变化以及温度场分布. 六环冗余轴向磁力轴承的热源主要是线圈通电流后的发热(铜损耗)以及铁心发热(铁损耗). 在对磁力轴承温度场进行分析的时候,只考虑铜损耗和铁损耗导致的发热.

### 1.2.1 轴向磁力轴承铜损耗

轴向冗余磁力轴承的铜损耗可以用以下公式计算<sup>[5]</sup>

$$P_{cu} = I_{max}^2 r = I_{max}^2 \frac{\rho L}{S}. \quad (1)$$

式中: $r$ 为线圈的电阻; $\rho$ 为线圈的电阻率; $L$ 为线圈的总长度; $S$ 为导线的横截面积.

### 1.2.2 轴向磁力轴承铁损耗

冗余轴向磁力轴承的铁损耗主要由磁滞损耗和涡流损耗组成. 当铁心的磁通密度在 0.2T ~ 1.5T之间时,其磁滞损耗满足以下关系式<sup>[5]</sup>:

$$P_h = k_h f_r B_m^{1.6} V_{fe}. \quad (2)$$

式中: $k_h$ 为铁心的材料常数,对于硅钢片和电工纯铁来说  $k_h < 1$ ;  $B_m$ 为磁路中磁通密度变化的幅值; $f_r$ 为再磁化频率; $V_{fe}$ 为冗余轴向磁力轴承的铁心体积. 在计算相关损耗时, $V_{fe}$ 分别指图1中定子以及推力盘的体积. 其中,左定子体积为 213 441.679 mm<sup>3</sup>;右定子体积为 255 651.073 mm<sup>3</sup>;推力盘体积为 159 281.617 mm<sup>3</sup>.

六环冗余轴向磁力轴承的涡流损耗的计算要比磁滞损耗复杂一些:由于六环冗余轴向磁力轴承不仅和普通轴向磁力轴承一样采用实心式铁心结构,而且如图1所示定子中含有侧壁结构,侧壁的存在会使得轴向磁力轴承和径向磁力轴承一样也存在着转子的反复磁化. 所以,冗余轴向磁力轴承的涡流损耗  $P_e$  由两部分组成:一部分是有高频谐波电流引起的  $P_{e1}$ ,按照轴向磁力轴承涡流损耗的计算公式(3)计算;另一部分是由于转子的反复磁化而引起的  $P_{e2}$ ,按照径向磁力轴承涡流损耗的计算公式(4)计算.

对于普通的轴向磁力轴承,其涡流损耗为<sup>[6]</sup>

$$P_{e1} = \sigma_w \left( \frac{f}{100} B_m \right)^2 V_{fe} r_{fe}. \quad (3)$$

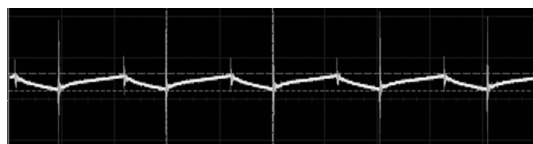
式中: $\sigma_w$ 为涡流损耗系数,对于电工纯铁来说,  $\sigma_w = 2$ ;  $f$ 为开关放大器输出的高频电流的频率; $B_m$ 为交变磁感应强度的幅值; $V_{fe}$ 为铁心的体积; $r_{fe}$ 为电工纯铁的比重,取  $7.87 \times 10^3$ .

对于径向磁力轴承来说,由于主轴的转动会引起转子的反复磁化从而产生大量涡流,所以其涡流损耗可为<sup>[5]</sup>

$$P_{e2} = \frac{1}{6\rho} \pi^2 e^2 f_r^2 B_m^2 V_{fe}. \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为铁心单位电阻; $e$ 为叠片厚度; $f_r$ 为再磁化频率; $V_{fe}$ 为铁心的体积.

公式(3)、(4)中的  $B_m$  均指磁力轴承气隙中磁感应强度的变化幅值. 由于轴向磁力轴承的  $B_m$  是由线圈中电流的变化产生的,所以需要通过实验测得线圈中电流的变化. 图2是实验测得的六环冗余轴向磁力轴承功率放大器上电流传感器的输出电压波形,其对应的电流波形即是线圈中电流的实际变化.



(横轴 20 μs/格,纵轴 1 V/格)

图2 功率放大器上电流传感器输出的电压波形

Fig.2 Voltage waveform from the Current sensor in the power amplifier

根据安培环路定理<sup>[7]</sup>以及  $H = \frac{B}{\mu} = \frac{\phi}{\mu A}$ ,得

$$\oint H \cdot ds = H_s l_s + H_r l_r + H_0 2x = NI. \quad (5)$$

$$B_0 \approx NI \frac{\mu_0}{2x}. \quad (6)$$

式中: $H_s$ 为定子铁心的磁感应强度; $H_r$ 为转子铁心的磁感应强度; $H_0$ 为气隙中的磁场强度; $I$ 为线圈中的电流; $\mu_0$ 为真空磁导率; $N$ 为线圈匝数; $x$ 为轴向磁力轴承的单边气隙大小.

假设线圈中电流的表达式如下所示:

$$I = I_0 + I_m f(t). \quad (7)$$

式中: $I_0$ 为线圈电流中由直流稳压电源提供的直流部分; $I_m$ 为线圈电流的交流幅值.

将式(7)带入式(6)中,可得磁力轴承中的磁感应强度  $B_0$  的表达式如下:

$$B_0 \approx \frac{\mu_0 NI_0}{2x} + \frac{\mu_0 NI_m f(t)}{2x} = B_1 + B_2 f(t). \quad (8)$$

根据电磁学的相关理论,交流电才会产生涡流损耗,所以公式(3)、(4)中的  $B_m = B_2 = \frac{\mu_0 NI_m}{2x}$ .

上述公式中, $I_m$ 需要根据图3中电流传感器所测的电压幅值  $V_m' = \Delta Y/2 = 109.37 \text{ mV}$  以及电

压对应的电阻值  $300\ \Omega$  求出,最后求出  $I_m' = V_m'/R = 0.36\ \text{mA}$ . 由于计算得出的  $I_m'$  是经过电流传感器转化得出的电流值,而轴向磁力轴承实际电流  $1\ \text{A}$  对应电流传感器上电流值  $3\ \text{mA}$ ,所以,轴向磁力轴承线圈上的实际电流幅值  $I_m = 0.12\ \text{A}$ . 另外,通过实验利用示波器可以测出高频电流的频率  $f = 50\ \text{kHz}$ .

从计算涡流损耗的公式(3)、(4)可以看出,由于六环冗余轴向磁力轴承所采用的电工纯铁材料的单位电阻率很低,这就会造成其涡流损耗很大. 而从磁滞损耗的公式不难发现,由于  $k_h < 1$ ,导致磁滞损耗比涡流损耗小至少 4 个数量级. 文献[8]具体验证了当磁力轴承转速较高时磁滞损耗在总损耗中所占的比例可以忽略不计. 所以,在计算铁损耗的过程中,可以近似地认为铁损耗约等于涡流损耗.

1.3 六环轴向磁力轴承生热率计算

生热率  $q$  指热源单位的发热量,计算公式为<sup>[9]</sup>

$$q = \frac{Q}{V}.$$

(9)

式中: $Q$  为热源即整个系统的发热量; $V$  为热源的体积. 对于线圈, $Q$  指的是线圈工作时产生的铜损耗引起的发热量;对于轴向定转子来说, $Q$  指的是轴向磁力轴承定转子工作时产生的铁损耗引起的发热量.

1.4 对流换热系数和热传导系数

应用 ANSYS Workbench 热分析模块时需要找出各个部分的热传导系数和对流换热系数. 表 1 是根据文献[9-10]分析相关磁力轴承温度场以及所用材料得出的各个部分的热传导系数和对流换热系数.

表 1 各部分热传导系数和对流换热系数

Tab.1 The thermal conductivity and heat transfer coefficient of different parts

组件名称	热传导系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	对流换热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
轴向定子	52	9.7
轴向转子	48	9.7
线圈	370	9.7

1.5 轴向磁力轴承温度场仿真分析

利用 ANSYS Workbench 对六环冗余轴向磁力轴承进行温度场仿真. 首先根据式(1)、(3)、(4)计算出相关损耗,然后求出各个热源的生热率,同时代入热传导系数和对流换热系数,选用

SOLID70 单元对模型进行网格划分,最后进行求解.

图 3 为六环冗余轴向磁力轴承转子磁化示意图. 从图 3 可以看出,六环冗余轴向磁力轴承定子结构的磁极序列为 NSNSNSNS,即当转子每旋转一周会被反复磁化 6 次,所以再磁化频率  $f_r$  为旋转频率的 6 倍.

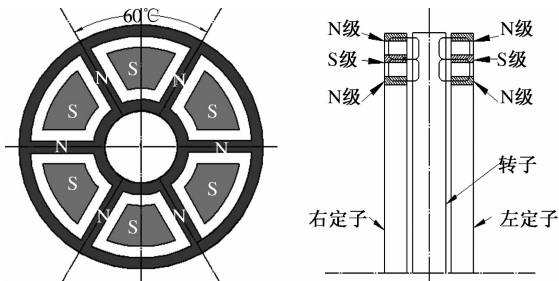


图 3 六环冗余轴向磁力轴承转子磁化示意图

Fig.3 The Magnetization schematic of six-ring redundant axial magnetic bearing

计算时以转子转速  $7\ 200\ \text{r/min}$  为例. 由于旋转过程中转子的反复磁化,定子和转子的涡流损耗是有所区别的. 对于定子来说,磁铁中的磁通变化是由控制电流变化引起的<sup>[7]</sup>,所以对于定子来说,工作时铁损耗所产生的生热率  $q = 2.51 \times 10^5\ \text{W/m}^3$ . 而对于转子来说,随着旋转频率的增加,涡流损耗会逐渐变大. 根据转子的转速得出转子的再磁化频率  $f_r = 720\ \text{Hz}$ ,生热率  $q = 5.09 \times 10^5\ \text{W/m}^3$ . 表 2 具体列出了当转子转速从  $0 \sim 36\ 000\ \text{r/min}$  变化时,六环冗余轴向磁力轴承转子的生热率. 另外,线圈的生热率为  $63\ 215.7\ \text{W/m}^3$ ,定子生热率为  $2.51 \times 10^5\ \text{W/m}^3$ .

表 2 不同转速下定转子和线圈的生热率

Tab.2 The Heat production of coils, stators and rotors in different speeds

主轴转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	转子生热率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )
0	$2.51 \times 10^5$
7 200	$5.09 \times 10^5$
14 400	$1.24 \times 10^6$
21 600	$2.49 \times 10^6$
28 800	$4.22 \times 10^6$
36 000	$6.45 \times 10^6$

结合表 2 的数据对六环冗余轴向磁力轴承进行温度场仿真,得出其整体温度分布. 取磁力轴承上具有代表性的 5 个部分,每个部分上取一个点,以 5 个点的平均值作为磁力轴承整体的平均温

度.图 4 给出了转速为 7 200 r/min 时的温度场.图 5 为转子转速变化时整个磁力轴承平均温度的变化情况.

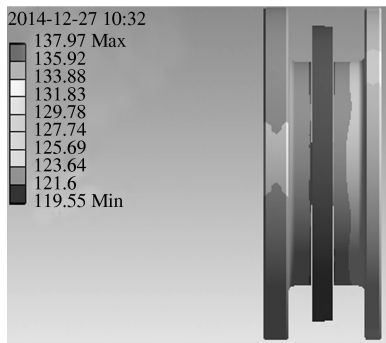


图 4 转速为 7 200 r/min 时轴向磁力轴承温度场

Fig. 4 The temperature field of axial magnetic bearing when the rotor speed is 7 200 r/min

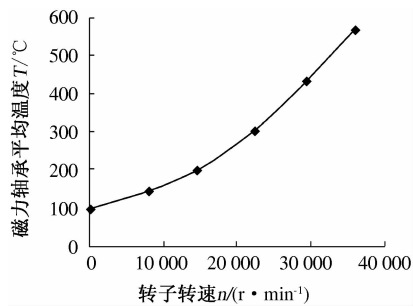


图 5 不同转速下轴向磁力轴承整体的平均温度

Fig. 5 The overall average temperature of axial magnetic bearing in different speeds

从图 4,5 可以看出:六环冗余轴向磁力轴承的最高温度出现在转子部分.转速为 7 200 r/min 时,整个磁力轴承的平均温度约为 131.6 ℃;随着转速的升高,整个磁力轴承的平均温度逐渐上升,当转速超过 10 000 r/min,整个磁力轴承的平均温度已经超过 150 ℃.因此说明:六环冗余轴向磁力轴承定子上侧壁结构的存在导致转子被反复磁化,致使转子的涡流损耗增加.

下面对其结构进行改进:去掉定子六环结构的侧壁,使转子旋转过程中不被反复磁化,减少转子的涡流损耗.

2 无侧壁六环轴向磁力轴承的温升

2.1 无侧壁六环冗余轴向磁力轴承结构设计

无侧壁六环冗余轴向磁力轴承结构设计时选择磁极面积相等的设计准则,最终设计出的单环定子的内环面积约为 405 mm<sup>2</sup>,外环面积约为 428 mm<sup>2</sup>,如图 6 所示.

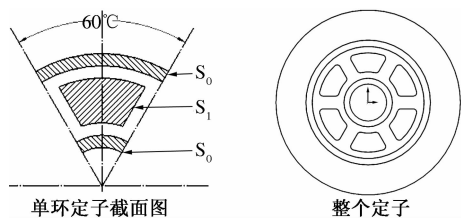


图 6 无侧壁六环冗余轴向磁力轴承定子结构图

Fig. 6 The stator structure of six-ring redundant axial magnetic bearing without side

与有侧壁六环结构相比,无侧壁六环结构的轴向磁力轴承的磁极面积并没有较大变化.有、无侧壁六环结构的轴向磁力轴承失效补偿后的承载力如表 3 所示.可以看出,无侧壁六环结构轴向磁力轴承承载力大于有侧壁六环结构的.

表 3 有、无侧壁六环轴向冗余磁力轴承失效补偿后承载力

Tab. 3 The capacity of two kinds of six-ring redundant axial magnetic bearing after compensating N

失效级数	有侧壁结构	无侧壁结构
0 级	89.9	91.04
2 级	108.2	112.42
3 级	89.4	92.13
4 级	89.9	92.87

2.2 无侧壁六环轴向冗余磁力轴承温度场分析

无侧壁六环结构在计算涡流损耗的时候,不存在转子的反复磁化引起的涡流损耗  $P_{e2}$ ,所以,在计算时转子的涡流损耗  $P_e = P_{e1}$ .铜损耗以及最后生热率的计算都与前文一样.当转速为 0 ~ 36 000 r/min,无侧壁六环结构的轴向磁力轴承的平均温度如图 7 所示.

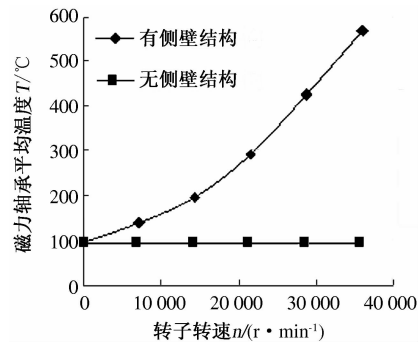


图 7 有、无侧壁的六环冗余轴向磁力轴承整体的平均温度

Fig. 7 The average temperature of two kinds of six-ring redundant axial magnetic bearing

由图 7 可见,无侧壁六环冗余轴向磁力轴承整体的平均温度不随转子转速升高而升高.

3 六环冗余轴向磁力轴承不同失效重构时温度场仿真

六环冗余轴向磁力轴承单个定子有 11 种线圈失效形式<sup>[4]</sup>. 笔者对六环结构的轴向磁力轴承失效重构后的温度场进行计算. 图 8 是 3 种经典失效形式及正常工作的示意图. 表 4 是计算出的 3 种失效情况及正常工作下线圈的生热率.

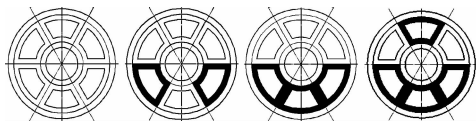


图 8 3 种失效形式及正常工作示意图  
(黑色表示失效线圈)

Fig. 8 Schematic diagram of three failure and normal working modes

表 4 3 种失效情况及正常工作下的热源体积及生热率  
Tab. 4 The heat source volumes and heat productions of three failure and normal working modes

失效级数	冗余补偿 电流	热源体积 V/mm <sup>3</sup>	生热率 q/ (W · m <sup>-3</sup> )
0	3	96 969. 6	63 215. 7
2	$3\sqrt{1.5}$	64 646. 4	94 823. 5
3	$3\sqrt{2}$	48 484. 8	126 431. 3
4	$3\sqrt{3}$	32 323. 2	189 647. 1

当转子转速为 7 200 r/min, 在不同失效重构及正常工作时, 轴向磁力轴承温度场见图 9.

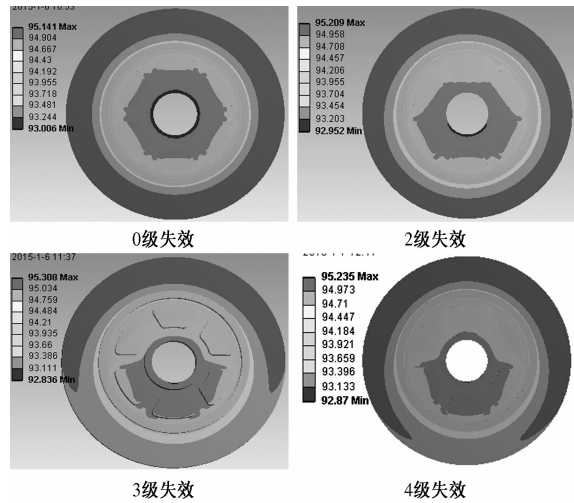


图 9 不同失效重构及正常工作时定子温度场  
Fig. 9 The stator temperature filed of three failure and normal working modes

从图 9 可以看出: 不同失效重构之后, 轴向磁力轴承的整体温度变化不大, 最高温度都没有超过 100 ℃. 随着轴向磁力轴承失效级数的增加, 线

圈腔的温度场呈现一定程度分布不均匀的现象, 但温度差并没有超过 1 ℃.

以上两点可以说明: 不同失效重构方案对轴向磁力轴承的温度变化影响很小.

4 结论

(1) 给出了六环冗余轴向磁力轴承的温度场的计算方法. 研究结果表明: 六环冗余轴向磁力轴承的结构形式对转子的温升影响较大, 磁路设计时应该避免导致转子旋转时的反复磁化.

(2) 失效重构对六环冗余轴向磁力轴承的温升影响较小, 只是温度场分布较失效前略不均匀, 但温度差并没有超过 1 ℃, 因此可以忽略其影响.

(3) 六环冗余轴向磁力轴承的结构较原有的两环冗余轴向磁力轴承具有更高的可靠性、力学特性以及较好的热特性.

参考文献:

[1] 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.

[2] 李新生, 杨作兴, 赵雷, 等. 轴向电磁轴承发热问题研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(8): 1015-1019.

[3] 张姝娜, 房建成, 韩邦成, 等. 磁悬浮飞轮转子组件温度场分析与研究[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 5(1): 67-71.

[4] 黄龙飞. 多环轴向磁力轴承冗余设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2014.

[5] SCHWEITZER G, MASLEN E H. Magnetic bearing: theory, design, and application to rotating machinery [M]. Beijing: Springer, 2012.

[6] 辛璐. 磁悬浮支承的温度场理论分析与实验验证[D]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2011.

[7] 陈秉乾, 王稼军. 电磁学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.

[8] 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): 102-108.

[9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[10] RIKUP, ANNEN, MARKOR, et al. Transient thermal model for radial active magnetic bearing [C]//The 10th International Symposium on Magnetic Bearings, August, 2006. Martigny: EPFL Lausanne, 2006: 416-421.