

文章编号:1000-8055(2011)02-0404-05

同极型结构和零偏置电流控制对 磁悬浮轴承损耗影响的试验分析

谢振宇¹, 吴凯峰¹, 石庆才¹, 黄佩珍²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 航空宇航学院

飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 设计了性能参数相同的同极型和异极型径向磁悬浮轴承并应用于磁悬浮轴承转子试验系统, 同时在轴向自由度分别采用有偏置和零偏置电流控制方式, 通过试验系统的自由降速试验分析了不同径向磁悬浮轴承结构和轴向电流控制方式对支承损耗的影响. 结果表明, 同时采用径向同极型结构和轴向零偏置电流控制方式能有效减少磁悬浮轴承的能量损失, 对提高全电航空发动机的效率有重要意义.

关 键 词: 磁悬浮轴承; 同极型结构; 零偏置电流控制; 涡流损耗; 磁滞损耗

中图分类号: TH133.3

文献标识码: A

Investigation on power loss of homopolar active magnetic bearing with zero-bias current control

XIE Zhen-yu¹, WU Kai-feng¹, SHI Qing-cai¹, HUANG Pei-zhen²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Key Laboratory of Vehicle Structural Mechanics and Control (Ministry of Education),
College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: Homopolar radial active magnetic bearing (AMB) and axial zero-bias current control were introduced into the AMB system in this paper. Influence on power loss of AMB by the two methods was investigated by actual operation of the system. The results show that these two methods can reduce power loss of AMB effectively, and can also be applied to improve efficiency of aero engine as compared with heteropolar radial AMB and axial bias current control.

Key words: active magnetic bearing; homopolar structure; zero-bias current control; eddy current loss; hysteresis loss

全电航空发动机为全电飞机提供动力, 是全电飞机的心脏, 磁悬浮轴承是全电航空发动机的核心关键部件. 虽然具有传统轴承无可比拟的优点, 但磁悬浮轴承仍然存在涡流和磁滞损耗, 特别

是在大功率应用场合 (如发动机、膨胀机、汽轮机等), 涡流和磁滞损耗很大, 需要采用强有力的冷却措施^[1].

根据公开文献, 目前同极型结构、零偏置电流

收稿日期: 2010-10-04; 修订日期: 2010-12-13

基金项目: 国家自然科学基金 (10702028)

作者简介: 谢振宇 (1968—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事机电一体化研究.

控制技术和永磁偏置结构三种方式可有效减小磁悬浮轴承的能量损失。

美国弗吉尼亚大学 Allaire P E 教授课题组最早详细研究了同极型径向磁悬浮轴承的能量损失问题,指出同极型结构效果明显^[2]。零偏置电流控制技术最早由日本千叶大学 Kenzo N 教授课题组提出,并用于储能飞轮转子的控制^[3-5]。由于采用同极型结构和零偏置电流控制技术能有效减小磁悬浮轴承的能量损失,引起了国外众多学者的兴趣并参与研究,成为当前磁悬浮轴承领域的研究热点^[6-8]。

目前国内对同极型磁悬浮轴承和零偏置电流控制技术的研究很少。清华大学核能与新能源技术研究院赵雷教授课题组对零偏置电流控制的单自由度磁悬浮轴承进行了仿真研究,仿真结果表明,该方法可以实现稳定控制^[9]。

永磁偏置磁悬浮轴承是利用永久磁铁取代偏置电流产生偏置磁场。其优点是可以显著降低功率放大器的损耗,减小安匝数,降低磁悬浮轴承的发热等^[10-12]。但由于既需要控制线圈又需要永磁体,因此结构复杂,且永磁体存在退磁等不确定性。另外永磁偏置磁悬浮轴承不能降低转子表面的涡流和磁滞损耗。

本文在卧式磁悬浮轴承转子系统试验台上同时采用径向同极型结构和轴向零偏置电流控制技术,研究了这两种方式的共同作用对磁悬浮轴承支承损耗的影响。

1 同极型结构

图1为常用的异极型径向磁悬浮轴承结构示意图,N极与S极沿周向交叉排列。当转子每转动一圈,转子表面同一位置将经历多次磁力线反向。虽然定子与转子一般均采用叠片结构,但涡流

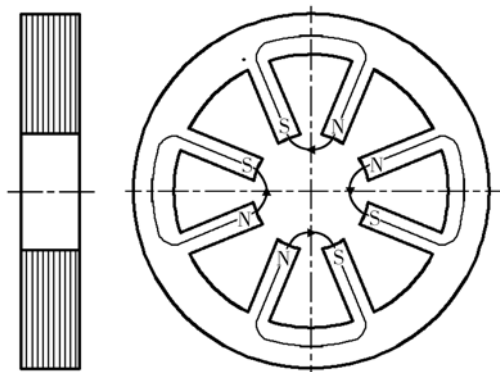


图1 异极型径向磁轴承示意图

Fig. 1 Schematic illustration of heteropolar active magnetic bearing

和磁滞损耗仍然较大。

图2为同极型径向磁悬浮轴承结构示意图,每一对磁极沿轴向分布,即沿周向只有N极或S极。当转子每转动一圈,转子表面同一位置的磁极性质相同,磁场强度的变化较小,因此涡流和磁滞损耗大大降低。

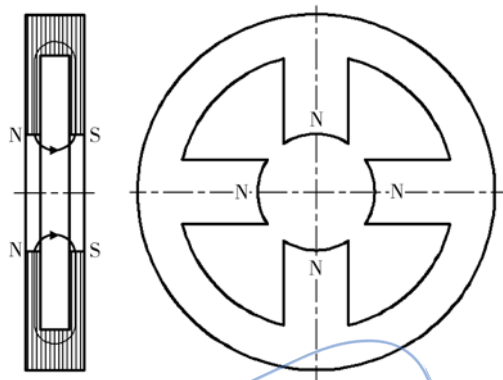


图2 同极型径向磁轴承示意图

Fig. 2 Schematic illustration of homopolar active magnetic bearing

为了通过试验比较异极型和同极型径向磁悬浮轴承在支承损耗上的差别,本文针对同一试验转子分别设计制作异极型和同极型径向磁悬浮轴承,其实物照片分别如图3和图4所示,其主要结构参数如表1所示。

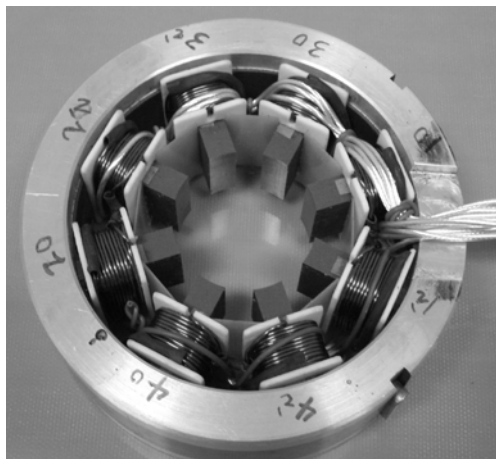


图3 异极型径向磁轴承实物照片

Fig. 3 Photo of heteropolar active magnetic bearing

由表1可知,因承载面积略有减小,为保证相同的最大承载力,同极型径向磁悬浮轴承的线圈匝数略有增加。除此之外,其余参数相同。

图5为常用的轴向磁悬浮轴承结构示意图。当转子每转动一圈,定子和转子表面的磁极性质不变,因此可视为同极型磁悬浮轴承。

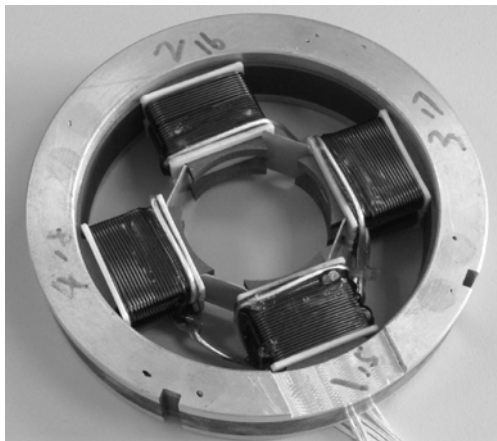


图4 同极型径向磁轴承实物照片

Fig. 4 Photo of homopolar active magnetic bearing

表1 径向磁轴承主要结构参数

Table 1 Parameters of the radial AMBs

	异极型	同极型
轴承内径/mm	40	40
轴承外径/mm	122	122
轴承宽度/mm	20	20
动环宽度/mm	22	22
偏磁电流/A	2.5	2.5
单边气隙/mm	0.25	0.25
匝数	33	38
最大承载力/N	80	80
位移刚度系数/ 10^5 (N/m)	-3.2	-3.2
电流刚度系数/(N/A)	32	32

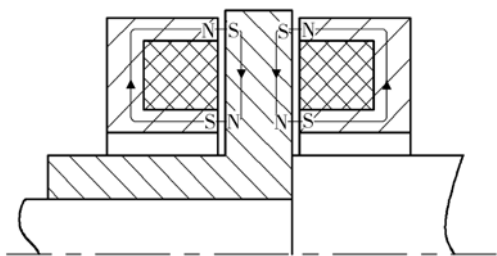


图5 轴向磁轴承示意图

Fig. 5 Schematic illustration of axial active magnetic bearing

2 零偏置电流控制

常见磁悬浮轴承在各自由度上为差动结构,即两边电磁铁所产生的磁场为偏置磁场与控制磁

场的叠加,其中偏置磁场由偏置电流 I_0 产生,控制磁场由控制电流产生.当转子出现偏移时,在控制器作用下,控制电流发生变化,使两边磁场的磁感应强度出现合适的差值,产生所需的电磁力,如图6所示.

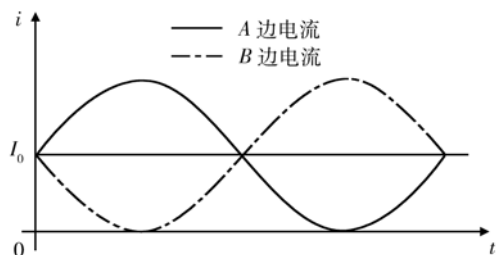


图6 有偏置电流控制示意图

Fig. 6 Schematic illustration of control with bias current

零偏置电流控制则不同,当转子在某自由度处于指定位置时,两边电磁铁中的电流为零;当转子在某自由度有偏移时,仅对应单边电磁铁有控制电流,如图7所示.由于取消了偏置电流,气隙中的磁感应强度明显减小,因此功率放大器损耗、涡流和磁滞损耗均大大降低.

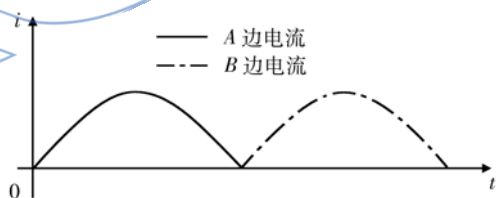


图7 零偏置电流控制示意图

Fig. 7 Schematic illustration of control without bias current

另一方面,零偏置电流控制导致磁悬浮轴承刚度降低,不利于提高系统的动态性能^[4].

3 自由降速试验

本文的卧式磁悬浮轴承转子系统试验台如图8所示.考虑到转子的最高转速超过系统的前两阶弯曲临界转速且径向各自由度受到重力和不平衡激励的影响,为提高系统在径向各自由度的稳定性和动态性能,对径向磁悬浮轴承仍采用有偏置电流控制.

分别进行试验1和试验2,其中试验1采用一般的异极型径向磁悬浮轴承和轴向有偏置电流控制;试验2则采用同极型径向磁悬浮轴承和轴

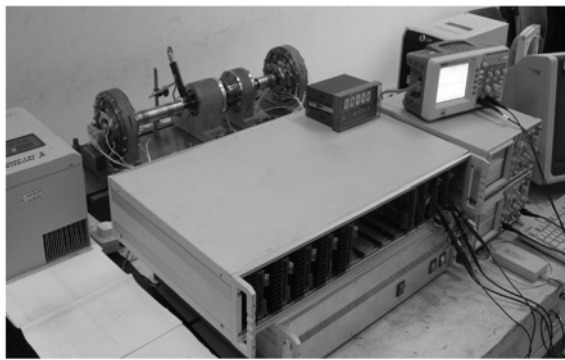


图8 试验系统实物照片

Fig. 8 Photo of the experimental setup

向零偏置电流控制。

磁悬浮轴承的控制参数如表2,其中 k_p , k_i , k_d 和 T_d 分别表示控制器比例系数、积分系数、微分系数和微分时间系数。

在试验1和试验2中,转子稳定悬浮,并由内置高频电机带动稳定运行至16000 r/min,然后关断高频电机电源,转子转速逐渐降低至零(自由降速)。

表2 磁轴承控制参数

Table 2 Control parameters of the AMBs

	k_p	k_i	$k_d/10^{-3}$	$T_d/10^{-5} s$
径向	2.55	16.61	6.9	1.12
轴向	1.62	12.88	2.7	1.12

在试验1和试验2自由降速过程中,转子转速随时间的变化曲线如图9所示。由图9可见,试验2的自由降速时间明显较长。

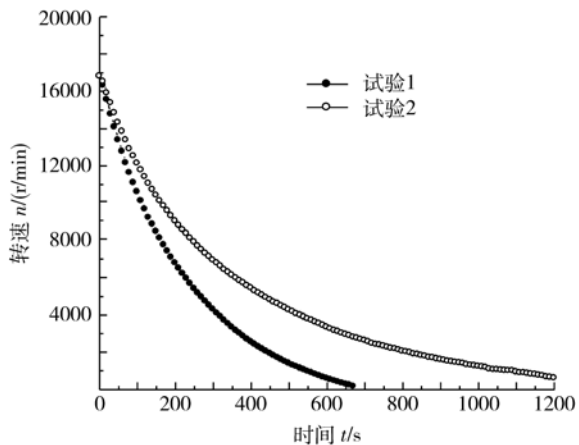


图9 转子自由降速曲线

Fig. 9 Curves for the rotor running down freely

4 磁悬浮轴承的功耗

关断高频电机电源后,由于存在空气摩擦、涡流和磁滞损耗,转子转速逐渐降低至零,即全部动能转化为空气摩擦损耗和磁悬浮轴承损耗。

在自由降速过程中,转子的能量和功率损耗分别如式(1)和(2)所示。

$$E_k = \frac{1}{2} J_p \omega^2 \quad (1)$$

$$P_k = \frac{dE_k}{dt} =$$

$$J_p \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_p}{dt} = J_p \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中转子的极转动惯量 J_p 为 $0.0017 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

由公式(2)可知,根据转子转速随时间的变化情况,可获得不同转速下空气摩擦和磁悬浮轴承的总功率损耗,如图10所示。

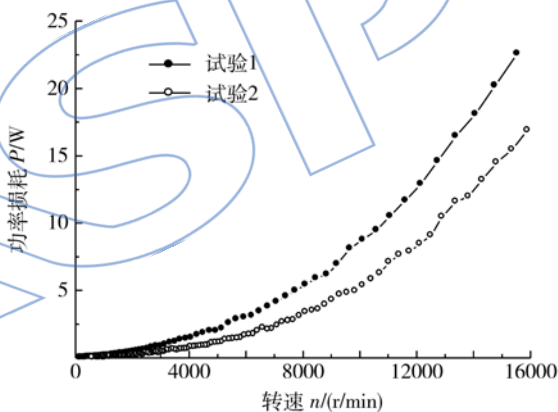


图10 转子功率损耗曲线

Fig. 10 Power loss curves of the rotor

可以认为,在试验1和试验2中,空气摩擦引起的损耗相同,图10中两条曲线的差值即为采用径向同极型结构和轴向零偏置电流控制所节省的功率。

由图10可见,随着转子转速的增加,径向同极型结构和轴向零偏置电流控制对减小涡流和磁滞损耗的作用越明显。

5 结论

通过系统自由降速试验分析了径向同极型结构和轴向零偏置电流控制的共同作用对磁悬浮轴承支承损耗的影响,并与一般磁悬浮轴承转子系统进行了比较。主要结论如下:

1) 对于同极型径向磁悬浮轴承,当转子每转动一圈,转子表面同一位置的磁极性质相同,磁场

强度的变化较小,因此涡流损耗和磁滞损耗大大降低。

2) 零偏置电流控制由于取消了偏置电流,气隙中的磁感应强度明显减小,因此功率放大器损耗、涡流损耗和磁滞损耗均大大降低。

3) 通过采用径向同极型结构和轴向零偏置电流控制,可以有效减小磁悬浮轴承的功率损耗,并且随着转速的增加,效果越好。

参考文献:

- [1] 陈立群. 电磁轴承精度控制及其应用研究[D]. 西安:西安交通大学,1999.
CHEN Liqun. Study on precision control and application of active magnetic bearings[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,1999. (in Chinese)
- [2] Kasarda M E F, Allaire P E, Norris P M, et al. Experimentally determined rotor power losses in homopolar and heteropolar magnetic bearings[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(4):697-702.
- [3] Kenzo N, Zihe L. Zero power nonlinear control of magnetic bearing system[C]//Proc. of the 8th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Mito., Japan: Ibaraki University, 2002: 83-89.
- [4] Budi R, Kenzo N, Yuki H, et al. Variable bias type AMB flywheel powered electric vehicle without any touchdown against load disturbance[C]//Proc. of the 12th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Wuhan:Wuhan University of Technology Press, 2010:588-593.
- [5] Budi R, Kenzo N, Kenta K, et al. A study on AMB flywheel powered electric vehicle[J]. JSME, Technical Journal, 2009, 3(1):1-12.
- [6] Alexei F, Patrick M, Kent D. Flywheel energy storage system with homopolar electrodynamic magnetic bearing[C]//Proc. of the 10th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Martigny, Switzerland:EPFL Lausanne, 2006.
- [7] Sun F, Zero K O. Power control for permanent magnetic suspension system[C]//Proc. of the 11th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Nara, Japan:Saitama University, 2008: 489-495.
- [8] Gen K, Noriyasu S, Osamu S. Development of low loss active magnetic bearing for the flywheel UPS[C]//Proc. of the 10th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Martigny, Switzerland:EPFL Lausanne, 2006.
- [9] 张凯,赵雷,赵鸿宾. 磁悬浮飞轮低功耗控制方法仿真研究[J]. 清华大学学报, 2004, 44(3):301-303.
ZHANG Kai, ZHAO Lei, ZHAO Hongbin. Zero-power control method for a flywheel suspended by active magnetic bearings[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 44(3):301-303. (in Chinese)
- [10] 孙津济,房建成. 磁悬浮飞轮用新型永磁偏置径向磁轴承的设计[J]. 轴承, 2008(3):8-13.
SUN Jinji, FANG Jiancheng. Design on new permanent magnet biased radial magnetic bearing in magnetic suspending flywheel[J]. Bearing, 2008(3):8-13. (in Chinese)
- [11] 杨磊,房建成,韩邦成,等. 磁悬浮飞轮用永磁偏置磁轴承漏磁分析[J]. 轴承, 2008(2):24-28.
YANG Lei, FANG Jiancheng, HAN Bangcheng, et al. Analysis and study on flux leakage for permanent magnet biased magnetic bearing in magnetically suspended flywheel application[J]. Bearing, 2008(2):24-28. (in Chinese)
- [12] Uhn J N, Hyun O K, Dong D L, et al. Design and analysis of new permanent magnet biased heteropolar magnetic bearings[C]//Proc. of the 11th Int. Symp. on Magnetic Bearings. Nara, Japan:Saitama University, 2008:594-597.