

箔片气体轴承静态特性和温度特性实验

冯 凯, 邓志洪, 赵雪源, 李文俊, 郭志阳
(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室 410082)

摘 要: 建立箔片气体径向轴承静态特性和温度特性测试实验台,通过变载荷和变转速两种实验方式对轴承起飞转速、摩擦阻力矩和轴承温升进行测量,研究分析轴承静态特性、温度特性与载荷、转速之间的关系.实验结果表明:在启停阶段,由于没有形成气膜,箔片气体轴承的摩擦阻力矩会出现较大的峰值,但当达到某一特定转速(起飞转速)后,摩擦阻力矩会迅速下降到某一极小值,并且起飞后的稳态轴承转矩会随载荷和转速的增大而增加.稳定状态下的轴承温度会稳定在某一值且相对于室温的温升极小,而且随着转速、载荷的增加近似于线性增大.

关 键 词: 箔片气体轴承静态特性; 温度特性; 实验台; 载荷; 转速

中图分类号: V229⁺.2; TH133.35 **文献标志码:** A

Test on static and temperature characteristics of gas foil bearing

FENG Kai, DENG Zhihong, ZHAO Xueyuan, LI Wenjun, GUO Zhiyang
(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A test rig was set up to check the static characteristics and temperature characteristics of the foil gas radial bearing. After applying different load and speed on the bearing, the bearing take off speed, friction moment and bearing temperature were measured respectively. Then, the bearing static characteristics and temperature characteristics in different load and speed were analyzed. Results showed that, since there was no gas film in the start-stop stage, the foil gas bearing friction torque peak appeared larger, but when reaching a certain speed (take off speed), the friction torque would drop to a pole small value, and the steady-state after take-off speed bearing torque increased with the applied load and speed. In addition, the bearing temperature stabilized at a certain temperature in the stable operation stage. The bearing temperature rise was very small and increased approximately linearly with the speed and load.

Key words: gas foil bearing static characteristic; temperature characteristic; test rig; load; speed

箔片气体轴承是一种自适应柔性支承的轴承,其结构简单,具有摩擦损失小、转速高、耐高温等特点,工作时无需润滑系统,避免了传统油轴承污染问题,降低了设备维护成本,是高速涡轮机械转子理想的支承部件^[1-3].目前,箔片气体轴承已成功应用在空气循环设备、增压膨胀机、压缩机、

收稿日期:2015-10-19

基金项目:国家自然科学基金(51305131); 国家科技支撑计划(2015BAG06801)

作者简介:冯凯(1982—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事箔片空气轴承和转子动力学研究.

引用格式:冯凯,邓志洪,赵雪源,等.箔片气体轴承静态特性和温度特性实验[J].航空动力学报,2017,32(6):1394-1399. FENG Kai,DENG Zhihong,ZHAO Xueyuan,et al. Test on static and temperature characteristics of gas foil bearing[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(6):1394-1399.

微型涡轮增压系统等领域,具有非常广泛的发展前景^[4-6].

箔片气体轴承的起飞转速、摩擦阻力矩和温度特性是评估其性能的重要参数,直接影响箔片气体轴承在工程领域的应用. 这些参数与轴承的箔片形状、箔片材料和预紧力等因素有关,从理论上是无法精确计算的,只能通过实验的方法来测定^[7-9]. 文献[10-13]对箔片气体轴承启停性能、承载能力和摩擦阻力矩等特性进行了实验研究,但是以上实验研究并没有深入地对轴承的起飞转速、摩擦阻力矩和温度三者之间的变化关系进行系统的研究和总结.

本文基于箔片气体径向轴承测试实验台,通过改变转子的转速及施加不同的载荷对箔片气体轴承的静态特性和温度特性进行了实验研究,总结分析了载荷、工作转速与箔片气体轴承静态特性及轴承温度特性之间的关系.

1 箔片气体轴承和测试实验台的搭建

图 1 所示为实验所用的波箔型箔片气体轴承结构,它主要由轴承套、弧形的波箔和顶箔组成. 实验轴承的箔片选用 GH145 材料. 轴承顶箔为工作表面,其表面有镀层,目的是为了减小在启停阶段轴承顶箔表面与转轴之间的干摩擦,提高轴承的使用寿命. 轴承波箔提供弹性支承,是由一系列拱形结构组成的. 轴承的顶箔和波箔同一端固定,而另一端自由. 工作时,转轴的旋转方向是由自由端向固定端^[14]. 如图 1 所示,静止状态时转轴与轴承是紧贴状态,随着转速的增加,由于气体黏性和楔形作用,转轴与轴承顶箔之间会形成气膜压力,支承转子工作. 图 2 为实验箔片气体轴承单个波箔的结构示意图. 轴承的具体结构尺寸参数见图表 1. 加工后轴承的总质量约为 0.446 kg,如图 3 所示,图中 h_0 为波箔的高度, l_0 为箔片的厚度, I_0 为波箔半长, s 为波箔节距.

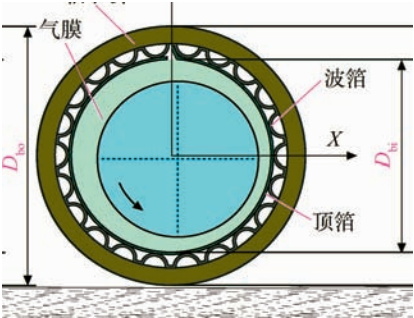


图 1 箔片气体轴承结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas foil bearing structure

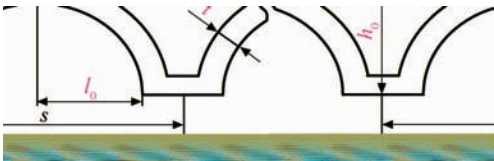


图 2 单个波箔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single bump foil structure

表 1 实验用箔片气体径向轴承结构参数

Table 1 Structure parameters for test gas foil radial bearing

参数	数值
轴承外径 D_{bo}/mm	36
轴承内径 D_{bi}/mm	30 ± 0.05
轴承轴向长度 L/mm	30
顶箔厚度 t/mm	0.12
波箔高度 h_0/mm	0.62
波箔半长 l_0/mm	0.015
波箔片厚度 t/mm	0.1
波箔节距 s/mm	2.7
轴承质量 M/kg	0.446

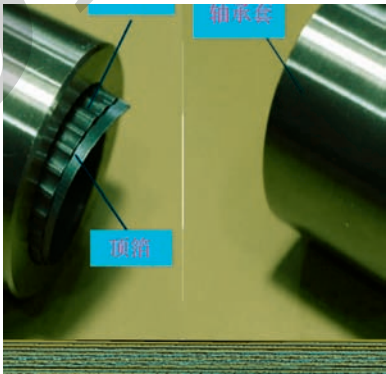


图 3 加工后的箔片气体轴承实物图

Fig. 3 Photograph of processed gas foil bearing

图 4 是测试箔片气体轴承特性实验台实物图. 选用以普通球轴承为支承的电动机作为动力源,驱动整个转子系统. 电动机的额定功率为 12 kW,实验台采用变频器控制电动机的工作转速,其最大转速可达 25 000 r/min. 在电动机的一端安装一根外径为 30 mm,长度为 100 mm 的转轴,并用螺母进行锁紧,安装时要注意保证转轴的动平衡. 另外,利用转矩杆来防止轴承的轴向移动和周向转动. 它的一端与轴承套连接,而另一端与弹性钢丝绳连接,并由砝码重物压紧. 整个实验台布置在一个工作平台上.

图 5 是测试箔片气体轴承特性实验台的原理图. 其中包括实验轴承、转轴和施加静态载荷、摩

擦阻力矩测试、转速测试及温度测试等装置. 与轴承在实际应用中不同的是, 实验台转轴是固定在电动机上进行旋转, 而轴承是悬浮在转轴上. 轴承径向载荷的施加是通过一根一端与轴承套相连而另一端连接加载重物的弹性钢丝绳以及滑轮机构来实现的, 这样便于研究不同的径向载荷对轴承特性的影响. 图中表示施加载荷 W_s 与轴承自身重力 W_d 呈 90° 方向, 因此施加在轴承上的总载荷为 $W = \sqrt{W_s^2 + W_d^2}^{[15]}$. 当转轴开始旋转时, 由于摩擦力的作用, 轴承会产生阻力矩, 通过与轴承套连接的转矩杆将力传递到钢丝绳上, 引起与弹性钢丝绳相连接的力传感器读数发生变化, 然后将测量的力 F 与力臂长度 L 进行相乘(摩擦阻力矩 $T = F \times L$)可以得到轴承的摩擦阻力矩 T . 转子系统的工作转速测量是通过安装在磁力座上的红外光电传感器配合黏贴在转轴端面的发光片来完成的, 转轴每旋转一周, 传感器就会接收一个方波信号, 测量误差不超过 1.5%. 同时还可以外接一个转速表, 用于实时显示转轴的工作转速. 测量轴承温度的热电偶安装方式如图 6 所示^[16], 将 K 型温度传感器的测量端伸到箔片气体轴承的内部, 紧贴在波箔的背面, 轴承的温度变化会引起温度传感器的数值变化, 进而可以测量出轴承的温度. 最后将所有传感器与自编的采集系统进行连接, 以便在实验过程中监控轴承的工作状况和记录实验数据.

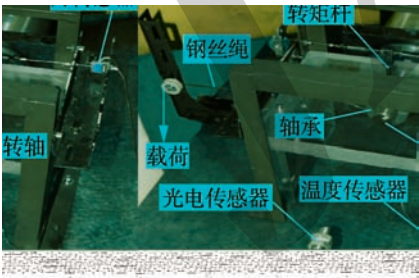


图 4 箔片气体轴承实验台照片

Fig. 4 Photograph of the test rig of gas foil bearing

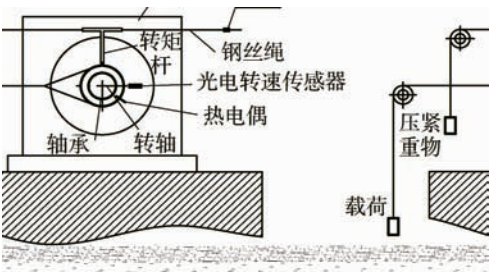


图 5 箔片气体轴承实验台原理图

Fig. 5 Principle diagram of gas foil bearing test rig

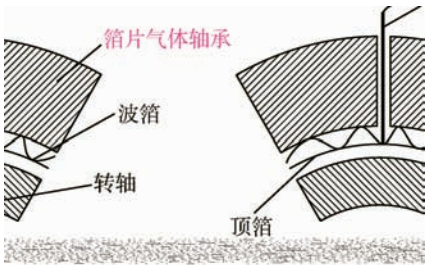


图 6 测量轴承温度的热电偶安装方式

Fig. 6 Installation way of thermocouple using to measure the bearing temperature

2 实验结果和分析

图 7 是在施加载荷为 16.1 N 的轴承起飞实验中测得的转轴转速 n 、轴承摩擦阻力矩 T 与时间的关系图. 在实验过程中, 通过人工调节变频器的频率改变实验台的工作转速. 从图中可以看到 0~15 s 为电动机启动前的状态, 当电动机启动转轴开始转动时, 箔片气体轴承的摩擦阻力矩会出现一个瞬时峰值 (126 N·mm), 说明转轴与轴承顶箔之间的接触为干摩擦. 随着转速的不断提高, 轴承的摩擦阻力矩有非常明显的下降, 当达到某一工作转速(起飞转速)后, 其值降为峰值的 20% 左右. 这是因为随着转速的提高, 轴承顶箔与转轴工作表面之间逐渐增大的气膜压力支承转轴与轴承顶箔互相分离, 使它们处于一个无接触的工作状态. 在转轴停止过程中, 随着转轴转速的降低, 箔片气体轴承的摩擦阻力矩也会出现一个峰值 (136 N·mm). 这是由于随着转速的下降, 气膜破裂使得转轴的工作表面与轴承顶箔之间逐渐接

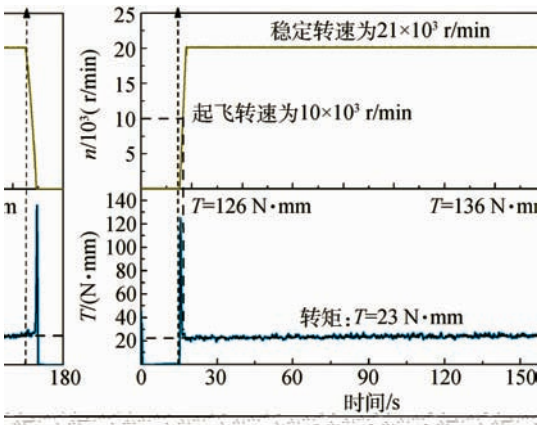


图 7 施加载荷为 16.1 N, 转轴转速、摩擦阻力矩和时间的关系

Fig. 7 Relationship of rotor speed, drag torque and time when applied load is 16.1 N

触,再次出现干摩擦现象.

图 8(a)是在稳定工作转速设定相同的情况下,对每个不同的施加载荷都进行一次加载实验得到的轴承摩擦阻力矩与时间的关系图.从图中可以看出,轴承摩擦阻力矩随着载荷的增大有增加的趋势.当施加的载荷由 12.2 N 增加到 16.1 N 时,稳态摩擦阻力矩的增大趋势更加明显.图 8(b)是在载荷为 16.1 N,稳定工作转速设定为 12×10^3 , 15.6×10^3 和 21×10^3 r/min 等条件下分别进行启停实验得到的轴承摩擦阻力矩与时间的关系图.从图中可以看到,随着设定的稳定工作转速的增大,稳态下的轴承摩擦阻力矩也呈现出增加的趋势.同时还可以看出在上述实验条件下,实验轴承在启停阶段的摩擦阻力矩峰值相差不大,但当轴承达到稳态时,载荷对轴承摩擦阻力矩的影响相比于转速更为明显.

可以计算出轴承的摩擦因数 f ,其中 R 为轴承半径.根据计算结果知:在启动阶段,实验轴承的摩擦因数 f 约为 0.5,表明转轴工作表面与轴承的顶箔之间存在干摩擦,而轴承起飞后形成稳定气膜时,摩擦因数 f 小于 0.1.

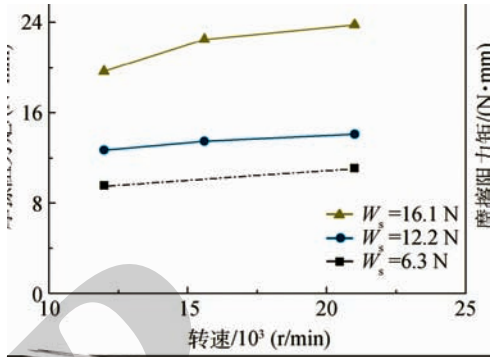


图 9 随施加载荷增加,轴承摩擦阻力矩随转速的变化

Fig. 9 Variation of bearing drag torque versus rotor speed for increasing applied loads

图 10 是在加载实验中得到的轴承起飞转速与施加载荷之间的关系图.文献[17]对起飞转速进行了定义,当转轴转速上升到某一特定转速后,转轴与轴承顶箔之间形成的气膜压力支撑转轴与轴承顶箔互相分离,测量的摩擦阻力矩相对于启动时的阻力矩峰值有非常明显的下降,可以判定这一转速为轴承的起飞转速.从图中可以看到,轴承的起飞转速随载荷的增加呈增大趋势,且实验轴承在不同载荷下的起飞转速均在 1×10^4 r/min 左右.实验结果表明施加载荷每增加 1 N,实验轴承的起飞转速相应增加约 1%^[12].

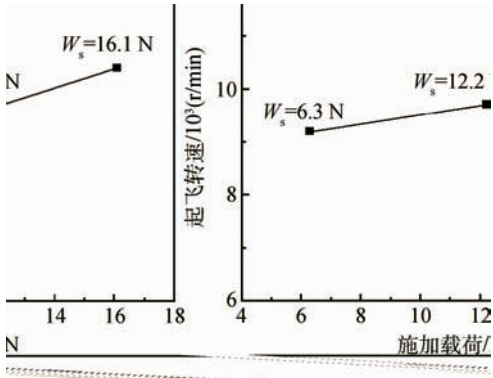


图 10 不同施加载荷下轴承的起飞转速

Fig. 10 Take off rotor speed with different applied loads

图 9 是进行多次加载实验后得到的箔片轴承的稳态平均摩擦阻力矩与转速、载荷之间的关系图.从图中可以更加直观的看到,轴承的稳态平均摩擦阻力矩随着转速或载荷的增大呈增加的趋势.另外根据文献[15]中的经验公式 $f=T/WR$

图 11 是箔片气体轴承的温升与载荷、转速之间的关系图.在本文中,温升 Δt 定义为轴承稳定

工作时的温度与设定的起始温度(室温)之间的差值。一般地,随着所施加的静态载荷或转速的增加,箔片气体轴承的温升将会表现出近似于线性增加的规律^[18]。本文实验结果也验证了这一结论,但温升 Δt 的变化范围非常小,即使是在载荷最大时,轴承温升都小于 1°C 。实验结果表明轴承温度对载荷和转速的变化不敏感,也就是说实验轴承能够比较稳定的工作在变载荷或变转速的工况下。

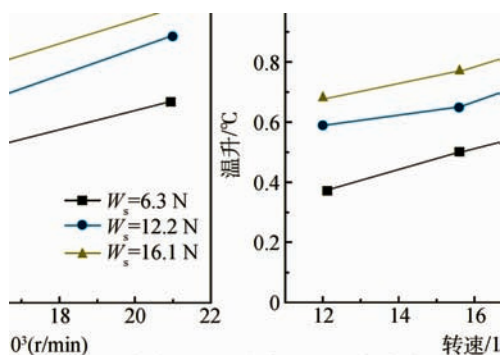


图 11 不同转速和不同施加载荷下的轴承温升

Fig. 11 Bearing temperature rise under different rotor speeds and applied loads

3 结 论

本文在设计实验台上对箔片气体轴承进行了一系列的实验,在不同载荷和不同转速等工况下,测定了箔片气体轴承的摩擦阻力矩、起飞转速、工作温度等特性,为轴承的设计、加工及应用提供了指导意义。根据实验数据可以得出以下结论:

1) 箔片气体轴承的摩擦阻力矩的峰值会出现在轴承启停阶段。

2) 箔片气体轴承稳态下的平均摩擦阻力矩随着载荷和转速的增大呈增加的趋势,摩擦因数一般都小于 0.1。

3) 箔片气体轴承的起飞转速随着载荷的增大表现出增加的趋势。

4) 在整个工作过程中,箔片气体轴承的温度随载荷和转速的变化范围是较小的。

5) 随载荷和转速的增大,轴承的温升近似于线性增大,但增大的幅度是非常小的,说明箔片气体轴承能够比较稳定的工作。

参考文献:

[1] HOWARD S A. A new high-speed oil-free turbine engine rotordynamic simulator test rig [R]. NASA/TM-2007-214489, 2009.

[2] RUBIO D, SAN ANDRÉS L. Bump-type foil bearing structural stiffness: experiments and predictions [R]. ASME Paper GT 2004-53611, 2004.

[3] DELLACORTE C. A new foil air bearing test rig for use to 700°C and 70 000 rpm [J]. STLE Tribology transactions, 1998, 41(3): 335-340.

[4] DELLA-CORTE C. Oil-free shaft support system rotordynamics: past, present and future challenges and opportunities [R]. Seoul: The 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics, 2010.

[5] AGRAWAL G L. Foil air/gas bearing technology: an overview. [R]. ASME Paper 97-GT-34, 1997.

[6] JONG S O, HEONSEOK L. Development of high-speed industrial turboblowers with foil air bearing [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines, 2010, 132(6): 735-740.

[7] SAN ANDRÉS L, RYU K, KIM T H. Thermal management and rotordynamic performance of a hot rotor-gas foil bearings system; Part I measurements [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(6): 062501. 1-062501. 10.

[8] RUDLOFF L, ARGHIR M, BONNEAU O, et al. Experimental analyses of a first generation foil bearing: startup torque and dynamic coefficients [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(3): 092501. 1-092501. 9.

[9] RADIL K C, DELLA-CORTE C. Foil bearing starting considerations and requirements for rotorcraft engine applications [R]. Army Research Report ARL-TR-4873, 2009.

[10] 杨利花, 石建华, 刘恒, 等. 弹性箔片动压径向气体轴承起飞转速和承载能力的实验研究 [J]. 润滑与密封, 2006, 31(3): 15-18.

YANG Lihua, SHI Jianhua, LIU Heng, et al. The experimental study on the lift off speed and load capacity of compliant and aerodynamic foil journal air bearing [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(3): 15-18. (in Chinese)

[11] SAN ANDRÉS L, CHIRATHADAM T A. A metal mesh foil bearing and a bump-type foil bearing: comparison of performance for two similar size gas bearings [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions, 2012, 134(10): 859-869.

[12] 刘江, 杜发荣. 波箔径向空气轴承起飞转速实验研究 [J]. 轴承, 2013(8): 27-29, 51.

LIU Jiang, DU Farong. Experimental study on lift-off speed of bump foil journal bearing [J]. Bearing, 2013(8): 27-29, 51. (in Chinese)

[13] 刘江, 杜发荣. 波箔径向空气轴承阻力矩研究 [J]. 轴承, 2013(9): 25-29.

LIU Jiang, DU Farong. Study on drag torque of bump foil journal bearings [J]. Bearing, 2013(9): 25-29. (in Chinese)

[14] DELLA-CORTE C, RADIL K, BRUCKNER R, et al. Design, fabrication and performance of open source generation I and II compliant hydrodynamic gas foil bearings [R]. NASA TM-2007-214691, 2007.

[15] SAN ANDRÉS L, CHIRATHADAM T A, KEUN R, et al. Measurements of drag torque, lift-off journal speed and temperature in a metal mesh foil bearing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines, 2010, 132(11): 2201-2210.

[16] RADIL K C, ZESZOTEK M. An experimental investigation into the temperature profile of a compliant foil air bearing[R]. NASA/TM-2004-213100, 2004.

[17] 彭万欢, 郑越青, 徐刚. 空气动压箔片轴承启停性能的实验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(7): 52-55.

[18] PENG Wanhuan, ZHENG Yueqing, XU Gang. Experimental study on the start-stop characteristic of foil air bearing[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(7): 52-55. (in Chinese)

[19] SAN ANDRÉS L, KIM T H, RYU K, et al. Gas bearing technology for oil-free microturbomachinery[R]. ASME Paper GT2009-5992, 2009.

(编辑:王碧琚)