

新型箔片动压止推气体轴承承载特性的试验研究

陈汝刚¹, 周权^{1,2}, 刘烨¹, 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安建筑科技大学环境和市政工程学院, 710055, 西安)

摘要: 根据箔片轴承的结构特点, 首次提出了一种具有鼓泡弹性支承的箔片轴承新结构, 并在止推轴承试验台上对新型鼓泡弹性支承止推气体轴承开展了试验研究, 对该轴承的稳定性及承载能力进行了初步测试和分析. 与通常具有弹性支承的波箔箔片轴承结构相比较, 该新型箔片止推轴承具有结构简单、加工方便的特点. 基于弹性力学的考虑, 通过改变半球型鼓泡的高度、直径及鼓泡的排列分布等一系列的参数来适应载荷的需要. 承载特性的试验研究显示, 所开发的止推气体轴承可通过鼓泡自身弹性变形很好地调节刚度和阻尼, 并具有较好的稳定性和承载能力.

关键词: 箔片轴承; 动压; 气体轴承; 承载特性

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0054-05

Experimental Study on Load Capacity for New Aerodynamic Foil Thrust Gas Bearing

CHEN Rugang¹, ZHOU Quan^{1,2}, LIU Ye¹, HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A kind of new aerodynamic foil thrust gas bearing with elastic hemispherical convex dots was proposed in this study. The experiment was conducted to test its stability and load capacity on a thrust bearing test rig. Then the measurement and the analysis were performed using wave and spectrum analysis method. The present bearing has simple configuration and is easy to fabricate compared with bump foil bearings. The height, diameter and arrangement of hemispherical convex dot distributions can be changed to fit the load requirement. The experimental results indicate that this new type thrust gas bearing has better flexibility to adjust its stiffness, and it shows good stability and load capacity.

Keywords: foil bearing; aerodynamic; gas bearing; load capacity

随着工业及科技的发展, 气体轴承高速透平机械得到了广泛的应用, 如移动式电源分布系统、燃料电池用空气燃料处理系统、空间逆布雷顿循环制冷机等, 各类气体轴承的理论分析、试验研究、开发应用也日趋深入. 就动压止推轴承而言, 目前国内外研究主要集中于悬臂型和波箔型^[1-3]. Iordanoff 等人 1995 年对波箔型止推轴承在工作转速为 50 000~80 000 r/min 的透平旋转机械上进行了初步的试验研究, 并从中获得了轴承的动态特性^[4]. Brian 等人

测量了不同工况下的波箔止推轴承的摩擦力矩, 并在考虑了摩擦力矩对轴承数和气膜间隙的影响下, 对试验轴承的气膜间隙进行了分析^[5]. 西安交通大学气体轴承透平膨胀机课题组为了适应动压气体轴承高速透平机械发展的需要, 多年来曾先后对阶梯式、螺旋槽式、可倾瓦式、铜丝平箔式、弹性片支承箔片式等不同形式的动压止推气体轴承开展了一系列探索试验研究^[6-8], 但终因部分试验零件加工制造困难或某些箔片元件自身结构及特性受限, 使得研究

结果的工业实用性还有待于进一步加强。

针对微小型气体轴承透平膨胀机,本文提出了一种具有鼓泡弹性支承的箔片止推动压气体轴承,并在止推轴承试验台上展开了初步的运转试验研究,轴承的稳定性及承载能力的测试和分析结果是令人满意的。

1 止推动压气体轴承结构

与刚性表面动压气体止推轴承相比,箔片动压气体止推轴承最大的特点是其具有柔性。箔片动压气体轴承的这种柔性表面,使得轴承的表面和支承结构在气体动压的作用下发生变形,从而引起气膜间隙的变化,而气膜间隙的变化反过来会影响轴承的压力分布。通过箔片元件的变形和相互间库伦摩擦力的作用,箔片轴承能够吸收多余的能量,使轴承-转子系统在一定的振动冲击和涡动范围内保持较高的稳定性。图1给出了箔片动压气体止推轴承的结构。

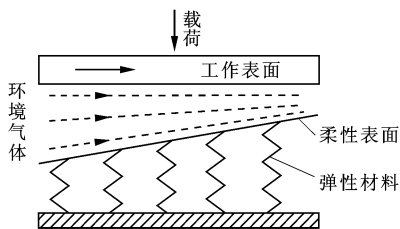
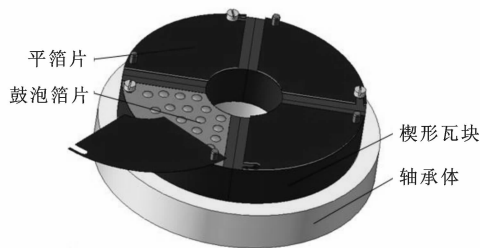


图1 箔片动压气体止推轴承结构

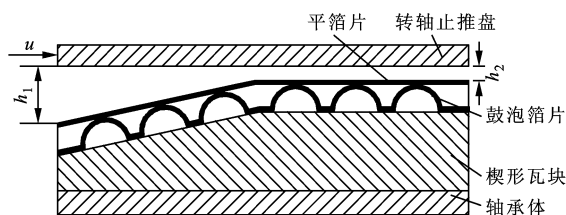
在不同的转速和载荷下,轴承表面会发生形变,因此需要通过改变气膜的厚度和刚度来适应工况的变化。箔片动压气体止推轴承的气膜间隙和压力场的变化是耦合在一起的,而箔片元件的结构能够直接影响止推轴承的压力分布和气膜间隙的间隔,为此需要精心选择合适的箔片元件。波箔型箔片轴承的结构复杂,起弹性支承作用的波纹状波箔加工难度也比较大,国内目前也尚未有实际产品。针对国内的加工技术,本文提出了一种结构简便的新型箔片动压气体止推轴承结构。

图2为鼓泡弹性支承的箔片止推动压气体轴承的结构,其由轴承座、支承箔片等元件组成。轴承座上安置有若干个周向均布的扇形瓦块,每个扇形瓦块的一端均加工有预楔角,扇形瓦块上连接的支承箔片均为扇形复合式箔片,复合式箔片由大小相同的一个扇形鼓泡箔片和一个扇形平箔片构成,鼓泡箔片置于扇形瓦块的上方、平箔片的下方。当止推轴承工作时,平箔片与转轴止推盘之间形成的动压气

膜可支承转轴的轴向载荷。这种新型鼓泡弹性支承箔片动压止推气体轴承的优点是结构简单,扇形平箔片及鼓泡箔片制作方便,箔片轴承表面刚度均匀。该轴承可以通过鼓泡的自身变形来调节轴承的刚度和阻尼,从而改善轴承的结构刚度和动态特性。



(a)结构示意图



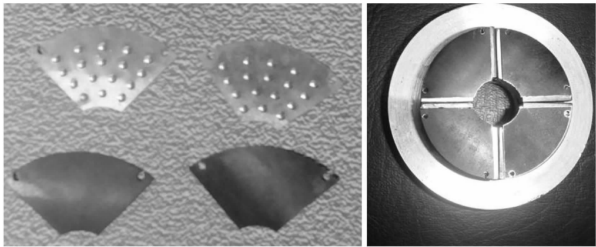
(b)工作示意图

图2 鼓泡型箔片动压气体止推轴承的结构及工作示意图

试验用楔形瓦块和箔片元件的结构参数如下:瓦块内半径 $R_1=6\text{ mm}$;瓦块外半径 $R_2=19\text{ mm}$;楔高 δ 等于进口气膜间隙 h_1 与出口气膜间隙 h_2 之差,即 $\delta=h_1-h_2=0.03\text{ mm}$;瓦块张角 $\beta=90^\circ$;瓦块楔形区张角 $\beta_b=45^\circ$;节距比 $b=\beta_b/\beta=0.5$;顶层是厚度为 0.05 mm 的铍青铜箔片;底层是厚度为 0.05 mm 的冷轧不锈钢(SUS304)箔片;弹性模量为 203 GPa ;鼓泡高度为 0.15 mm ;鼓泡直径为 2 mm 。鼓泡沿箔片半径方向从内往外分为4排,最内一排沿圆周方向每间隔 22.5° 分布3个鼓泡,其次一排每间隔 18° 分布4个鼓泡,外面两排间隔 15° 分布5个鼓泡。顶层铍青铜箔片表面镀有类石墨涂层,以用于减少启停时的摩擦阻力。图3为试验用鼓泡弹性支承箔片动压气体止推轴承。

2 振动特性及稳定性试验研究

为获得本文动压气体止推轴承的振动特性、稳定性及承载能力,在轴承试验台上展开了试验研究。图4所示为止推气体轴承试验台,主要由轴承转子系统、活塞加载系统和数据采集测试系统组成。轴承转子系统采用反动式叶轮驱动,工作轮外径为 25 mm 。为了避免径向轴承稳定性的影响,本文采用了



(a)鼓泡箔片及平箔片 (b)试验轴承
图3 试验用鼓泡弹性支承箔片动压气体止推轴承

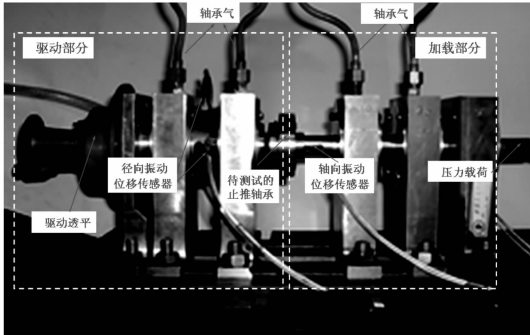


图4 止推气体轴承承载力测试试验台

2个双排切向小孔供气的径向气体轴承来支承主轴. 主轴直径为17 mm, 长度为177.5 mm, 止推盘外径为34.5 mm. 试验时, 通过改变透平驱动的气体流量及压力来调节转子的转速. 轴向活塞加载系统包括活塞轴、气缸、连接件. 鼓泡箔片动压气体止推轴承由连接件固定在活塞轴上, 2个静压气体轴承为活塞轴提供承载支承, 通过调节气缸的加载气压来施加和改变轴向载荷.

止推轴承振动特性及稳定性的测试参数主要包括转子径向振动、轴向振动、轴向承载力以及转子转速等. 整个测试是高频动态和准静态相结合的测量过程, 各测量参数及要求如表1所示.

试验时, 在主轴止推盘平面内分别安装了2个互为90°的高精度电涡流传感器, 以测试水平方向和竖直方向的相对径向位移. 轴向传感器安装在止推轴承的轴心, 以测量轴向传感器与止推盘的实时位移间隙及振动. 转子转速通过软件采集到的位移振幅信号进行实时快速傅立叶变换(FFT)频域分析获得. 用高精度的压力传感器来测量轴向加载的供气压力, 实测的位移、振幅、转速等信号经放大器放大后传给数据采集卡, 以便记录和保存.

3 测试结果

图5显示了不同加载工况下的鼓泡弹性支承

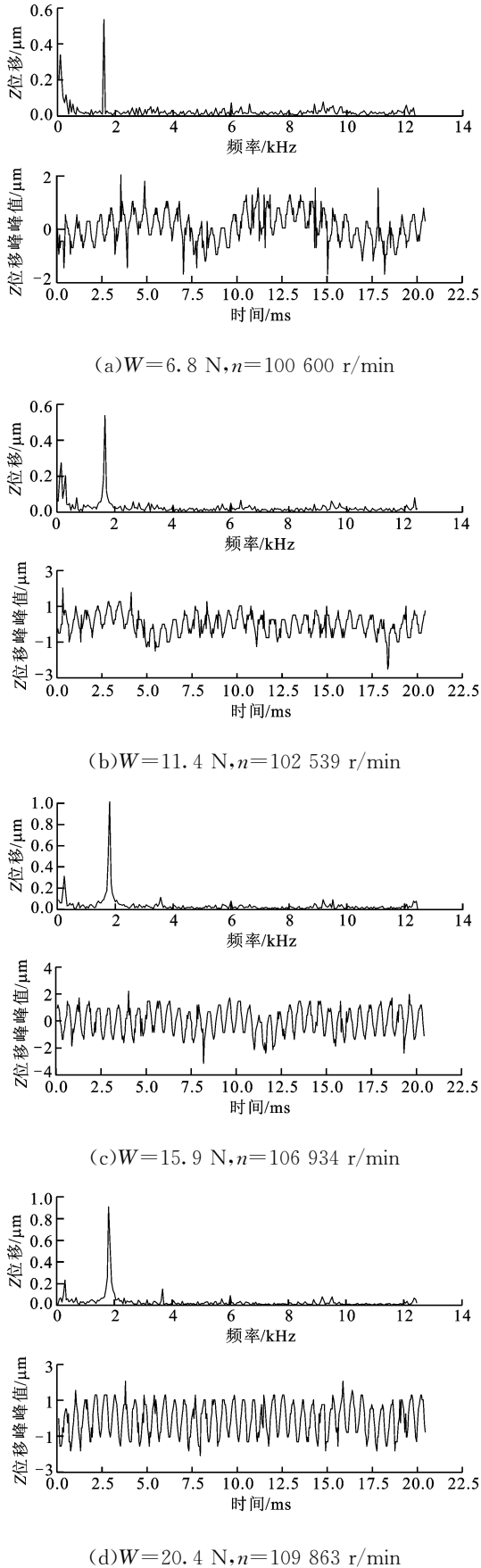


图5 鼓泡止推轴承加载过程的振动特性

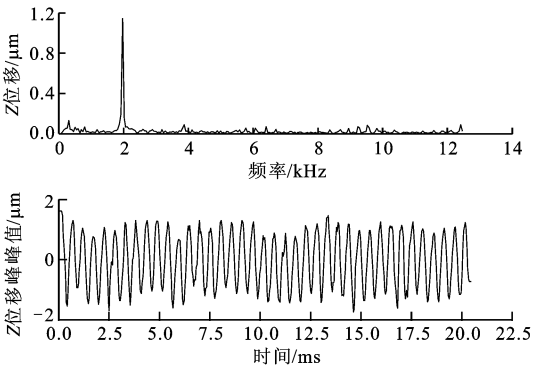
表 1 测量参数

测量范围				测量精度				动态响应			
气体压力	转子振幅	轴向间隙	转子转速	气体压力	转子振幅	轴向间隙	转子转速	气体压力测	转子振幅测	轴向间隙测	转子转速测
/MPa	/μm	/μm	/10 ⁴ r·min ⁻¹	/MPa	/μm	/μm	/r·min ⁻¹	量频率/kHz	量频率/kHz	量频率/kHz	量频率/kHz
0~1.0	±100	±100	0~13	0.001	0.5	0.5	<5	<0.1	<10	<0.1	<10

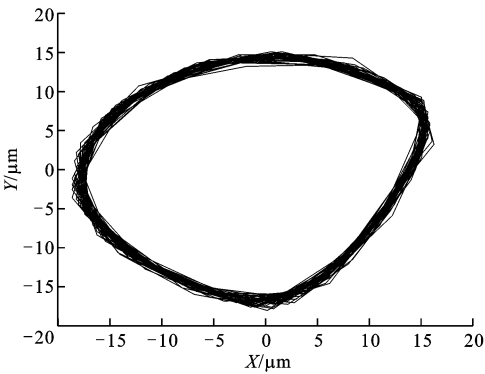
动压气体止推轴承的振动特性. 从图 5 轴向振动波形可以看出,随着载荷 W 的逐渐增加,波形波动幅度逐渐减小,并趋向于稳定的正弦波形. 相应地从图 5 频谱还可以看出,一倍频分量始终占据主导地位,高频分量完全可忽略不计,低频分量随着载荷的增加显著下降.

图 6 给出了鼓泡止推轴承在最高承载力(25 N)下的振动曲线和轴心轨迹. 从图 6 可以看出,转子的轴心轨迹相当稳定,转子的振动以工频为主. 图 7 绘出了鼓泡动压气体止推轴承的载荷振幅特性曲线. 试验结果表明,随着载荷的增加,轴向振动振幅逐渐降低,在当前的结构配置下测得的轴承最高承载力为 25 N. 本文的鼓泡弹性支承止推轴承具有较好的

刚度阻尼特性,其原因在于鼓泡的弹性变形能更好地适应轴承载荷的变化,这种变形能较好地吸收振动能量. 经研究发现,目前测试的顶层铍青铜箔片的厚度略显单薄,试验后的部分顶层铍青铜箔片被底层不锈钢(SUS304)箔片的鼓泡顶破,而底层不锈钢箔片及鼓泡本身比较完好. 因此,研究不同材质、不同结构参数下鼓泡止推轴承的最佳性能十分必要,鼓泡止推轴承有望在变更结构参数中通过增加顶层箔片的厚度、调节鼓泡跨距等来提升其承载力.



(a)振动特性



(b)轴心轨迹

图 6 W 为 25 N、 n 为 114 258 r/min 时鼓泡止推轴承的轴心轨迹和振动特性

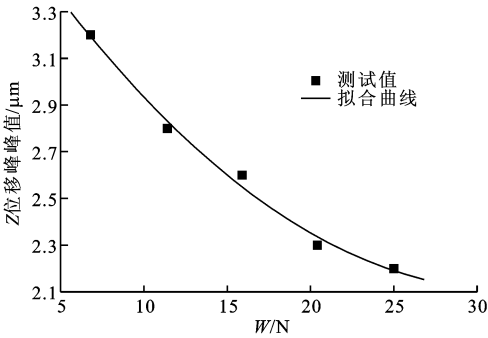


图 7 鼓泡止推轴承的载荷振幅特性

4 结 论

本文提出了一种具有鼓泡弹性支承结构的箔片动压气体止推轴承,并在试验台上对其稳定性和承载能力进行了初步测试、分析. 结果表明:针对单一结构参数的鼓泡轴承随着载荷的增加,轴向波动幅度逐渐减小;在转速为 114 268 r/min 下,获得的最高承载力为 25 N. 在加载过程中的轴向振动频谱图上显示出,一倍频分量占主导地位,低频和低频分量均可忽略不计,轴心轨迹清晰. 这说明本文开发的轴承结构可通过鼓泡自身弹性变形很好地调节刚度和阻尼,具有良好的可行性及适用性. 通过一系列的加载试验结果显示,本文箔片动压气体止推轴承具有良好的稳定性及承载能力,在高速透平机械上具有广阔的应用及发展前景. 后续工作是,进一步深入研究不同结构和运转参数下的鼓泡轴承.

参考文献:

[1] ETSION I, GREEN I. Dynamic analysis of a cantile-

- ver-mounted gas-lubricated thrust bearing [J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1981,103(1):157-163.
- [2] SALEHI M, HESHMAT H, WALTON J F. Advancements in the structural stiffness and damping of a large compliant foil bearing: an experimental study [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007,129(1):154-161.
- [3] 陈伟武, 张鸿兴. 推力波箔轴承的理论分析和试验研究 [J]. 上海机械学院学报, 1989,11(3):95-110.
CHEN Weiwu, ZHANG Hongxing. Theoretical analyses and experimental research of foil thrust bearing [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 1989,11(3):95-110.
- [4] IORDANOFF I, STEFAN P, BOUDET R, et al. Dynamic analysis of a thrust bearing: effect of misalignment and load [J]. Journal of Engineering Tribology, 1995, 209(3):189-194.
- [5] DYKAS B, BRUCKNER R, PRAHL J. Preliminary experimental characterization of the gas film in foil thrust bearings [C] // Proceedings of STLE/ASME International Joint Tribology Conference. New York, USA: ASME, 2006:1367-1368.
- [6] CHEN Chunzheng, YAO Hai, WU Yinong. Experimental study of self-acting gas-lubricated tilting-pad thrust bearings for cryogenic turbo expander [C] // Proceedings of 16th International Cryogenic Engineering Conference. Dirac House, England: Iop Publishing Ltd., 1996:217-220.
- [7] CHEN Chunzheng, WU Gang, XIONG Lianyou. The study of a small air refrigerator with plate foil aerodynamic bearings turbo-expander [C] // Proceedings of 17th International Cryogenic Engineering Conference. Dirac House, England: Iop Publishing Ltd., 1998: 193-197.
- [8] ZHOU Quan, HOU Yu, CHEN Chunzheng. Dynamic stability experiments of compliant foil thrust bearing with viscoelastic support [J]. Tribology International, 2009,42(5):662-665.

(编辑 苗凌 王焕雪)

(上接第 37 页)

- [2] 赵永辉. 离心式压缩机转子-轴承系统临界转速计算 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学机械工程学院, 2006.
- [3] 陆颂元. 转子系统阻尼固有频率的传递矩阵-多项式计算法[J]. 应用力学学报, 1986(3):73-82.
LU Songyuan. A method for calculating damped critical speeds and stability of rotor-bearing systems [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1986(3):73-82.
- [4] CHILDS D W, NOTEON G K A. Critical-speed solutions for finite element-based rotor models [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1982,104:412-416.
- [5] HASHISH E, SANKAR T S. Finite element and modal analyses of rotor-bearing systems under stochastic loading conditions [J]. ASME Journal of Vibration, Acoustics Stress and Reliability in Design, 1984, 106: 80-89.
- [6] MOLIER C B, STEWART G W. An algorithm for generalized matrix eigenvalue problems. [J] SIAM Journal on Numerical Analysis, 1973,10(2):241-256.
- [7] KAUFMAN L. A generalization of the LR algorithm to solve $Ax = \lambda Bx$, AD0745022 [R]. Stanford, CA, USA: Stanford University. Department of Computer Science, 1972.
- [8] WARD R C. The combination shift QZ algorithm [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1975,12(6): 835-853.
- [9] 钟一镔, 何衍宗, 王正, 等. 转子动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [10] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] 虞烈, 刘恒. 轴承-转子系统动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [12] 吴县制氧机厂, 江西制氧机厂, 西安交通大学. 空气轴承中压透平膨胀机研制第一阶段报告 [R]. 西安: 西安交通大学, 1978.

(编辑 苗凌 王焕雪)