

应用于高速透平膨胀机的箔片动压气体止推轴承的试验研究

周权^{1,2}, 侯予², 陈汝刚²

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

摘要: 针对现有箔片动压气体轴承结构较为复杂、理论分析比较困难,以及难以应用于高速旋转机械等问题,提出了改进的平箔型、黏弹性支承型、鼓泡型等箔片动压气体止推轴承. 在高速透平机械气体轴承试验台上,采用透平驱动转子-轴承系统以及静压轴承支承活塞杆施加轴向力等试验方法,对箔片动压气体止推轴承在不同转速下的承载性能进行了试验研究. 同时,利用快速傅里叶变换方法,分析轴承-转子系统在空间3个方向的振动信号,对箔片动压气体止推轴承的运转稳定性进行了探讨. 试验结果表明:平箔型动压气体止推轴承具有较高的轴向承载力,约为44 N,而鼓泡型动压气体止推轴承的性能非常稳定,轴承-转子系统的轴心轨迹十分清晰,轴向振动信号中低频和高频涡动可忽略不计,其振动频率以1倍频为主.

关键词: 箔片动压气体轴承; 高速透平膨胀机; 轴承性能

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0049-04

Experimental Research on Compliant Foil Thrust Bearings for High Speed Turbine Expander

ZHOU Quan^{1,2}, HOU Yu², CHEN Rugang²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For complex constructed foil bearing, it is difficult to theoretically analyze and apply to high speed rotation machinery. Three types of compliant foil bearing, including plate foil bearing, viscoelastic support foil bearing and foil bearing with convex dots, are proposed and investigated. On a test rig of high speed turbo machinery, the bearing-rotor system is driven by gas turbine, and the load capacity of foil thrust bearings is analyzed by hydrostatic gas bearing supporting and applying axial load. To discuss the running stability of foil thrust bearings, fast Fourier transform is chosen to analyze the vibration signals of bearing-rotor system. The results show that plate foil thrust bearings have the highest load capacity of 44 N, the rotor orbit of bearing-rotor system gets stable. The fundamental frequency is dominated in frequency domain, and the lower and higher frequencies can be ignored.

Keywords: compliant foil bearing; high speed turbine expander; bearing performances

箔片动压气体轴承采用气体作为润滑剂,具有柔性的工作表面(称为箔片元件),在不同的转速和

载荷下轴承表面会发生形变,因此可以通过改变轴承间隙内气膜的厚度和刚度来适应工况的变化. 通

过箔片元件的变形和相互间的库伦摩擦力的作用,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.与刚性表面动压气体轴承相比,箔片动压气体轴承有以下特点:当轴承失稳时,会对柔性的箔片轴承表面造成非灾难性的损坏,而不会对转子造成影响;轴承间隙随着转速的升高而增大,在高转速下,温升和功耗都比较小,因此具有较长的工作寿命和较好的工作性能.在同样的轴承间隙下,箔片轴承具有更大的承载力.

正因为箔片动压气体轴承具有以上的优点,许多国家都投入了相当多的人力物力对箔片轴承进行研究.美国、俄罗斯等都在箔片轴承的开发上取得了重要的进展,一些箔片轴承已经在高速透平机械上得到了应用.例如,在美国波音客机上,用于空气制冷机的箔片轴承的使用时间超过了100万h;俄罗斯开发了转速为24万r/min的箔片轴承用于低温氦透平膨胀机;美国MiTi公司研制了转速为12万r/min、启停次数超过10万次的用于涡轮增压器的箔片轴承.

国内对箔片轴承的研究起步较晚,原上海机械学院以及航天部609所等单位对波箔型和悬臂型箔片轴承进行了一系列的理论和试验研究,取得了一定程度的进展,但由于所研究的箔片轴承结构复杂,对其机理没有充分认识,加上国内工艺水平的限制,因此难以进入工业应用.为了适应高速透平机械的发展,国内迫切需要开发结构简单、启停性能优良,能保证透平膨胀机长时间稳定运行的动压气体止推轴承.

西安交通大学20世纪90年代开始就致力于动压气体轴承高速透平膨胀机的开发,陆续提出或改进了平箔型、黏弹性支承型、鼓泡型等箔片动压气体止推轴承,本文对这3种箔片动压气体止推轴承的结构特点、承载性能和运转性能进行了试验研究.

1 动压气体止推轴承的结构

1.1 平箔型动压气体止推轴承^[1-2]

在20世纪90年代,日本的林和宏教授提出了一种平箔型箔片动压气体止推轴承,西安交通大学针对该轴承进行了改进和开发.如图1所示,这种轴承的箔片元件由顶层的金属平箔和背面起支承作用的铜丝组成,各铜丝之间的角度相等,根据需要,可以制作成2层或3层结构,将箔片组件一端固定,一端自由,固定端稍低于自由端.

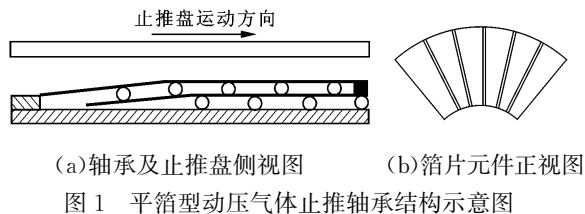
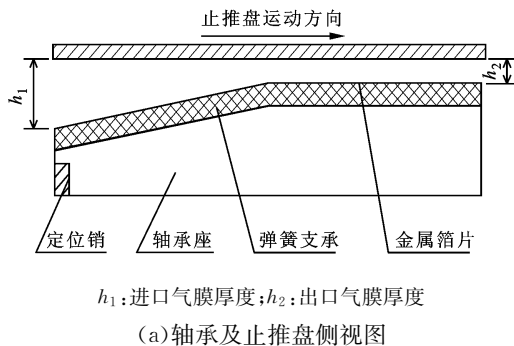


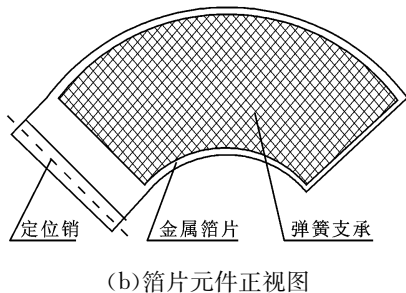
图1 平箔型动压气体止推轴承结构示意图

1.2 黏弹性支承型动压气体止推轴承^[3-5]

1999年,西安交通大学又提出了黏弹性支承箔片动压气体止推轴承,其中箔片元件是用金属箔片和固定在金属箔片下方的黏弹性支承薄片组合而成,与其他箔片动压气体止推轴承相比,该轴承结构非常简单,易于加工制作,具体结构如图2所示.



(a) 轴承及止推盘侧视图



(b) 箔片元件正视图

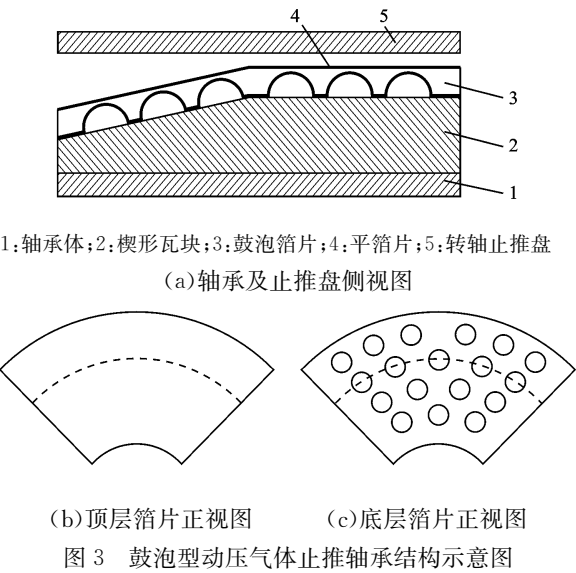
图2 黏弹性支承型动压气体止推轴承结构示意图

1.3 鼓泡型动压气体止推轴承^[6-7]

在对上述2种轴承进行研究的基础上,西安交通大学于2008年提出了鼓泡型箔片动压气体止推轴承.该轴承的箔片元件由2层金属构成,其中顶层是光滑的铍青铜箔片,底层是有多个泡点的铍青铜箔片或不锈钢箔片,如图3所示.图3a是鼓泡型动压气体止推轴承的剖视图,图3b是顶层箔片的正视图,图3c是底层箔片的正视图,在底层箔片上均匀分布的半球状鼓泡点是由模具冲压形成的.

2 动压气体止推轴承的性能试验

为深入研究箔片动压气体止推轴承的承载力、运转稳定性、启停性等机械性能,设计了一个高速透平旋转机械试验系统,试验主机如图4所示.该试验



台大体分为左右 2 个部分,左侧是高速旋转系统,右侧是轴向加载系统.高速旋转系统由空气透平驱动,径向采用静压气体轴承.轴向加载系统由高压气体推动活塞杆移动,从而对箔片动压气体止推轴承施加轴向力.试验主机的 2 个系统分别固定在几个不锈钢支架上,然后通过支架在精密导轨上定位.

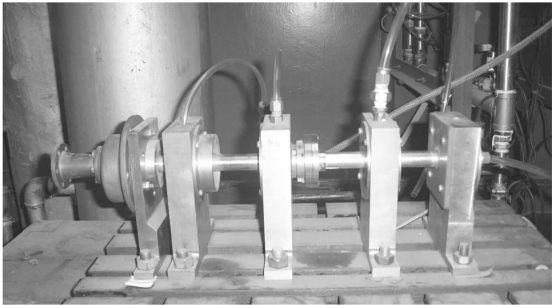


图 4 高速透平旋转机械试验主机

2.1 承载力试验结果

为了研究 3 种箔片动压气体止推轴承的承载力,在高速气体轴承试验台上进行了多次轴向加载试验.由于试验止推轴承完全由手工装配,因此装配误差较大.另外,由于透平膨胀机工作轮供气气流的波动,从而导致轴承-转子系统有时难以达到预定的工作转速(10 万 r/min),或者在较低的轴向载荷下使轴承-转子系统失稳.这些情况的发生,使得试验数据和正常情况下的数据相差很大,超出了预期误差,因此在试验结果中应予以剔除.在预定转速下对正常工作的止推轴承进行了反复多次的加载,为了比较 3 种轴承的承载力,取最高轴向承载力进行对比.需要指出的是,最高承载力不是一次试验的结

果,而是多次试验中的代表数据,实际上 3 种轴承的承载力在多数试验中都相当接近最高值(误差小于 15%),有关稳定性的试验数据也是对箔片动压气体止推轴承在预定转速下正常工作的振动信号进行分析得到的.在 10 万 r/min 下,内径为 12 mm、外径为 38 mm 的箔片动压气体止推轴承取得的最高轴向承载力为:平箔型止推轴承 44 N;黏弹性支承型止推轴承 38 N;鼓泡型止推轴承 25 N.

2.2 稳定性试验结果

对于止推轴承的运转稳定性,试验主要通过监测轴承-转子运转过程中的轴向振动并结合轴心轨迹进行判断.在转速为 10 万 r/min、轴向加载为 20 N 时,3 种轴承的稳定性能如图 5~图 7 所示.

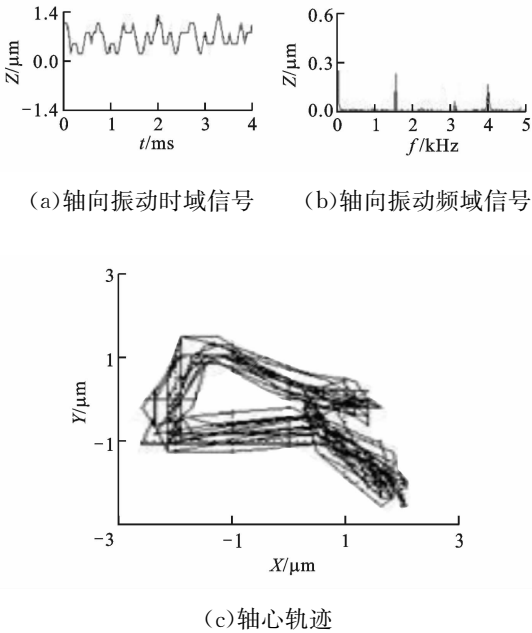


图 5 平箔型止推轴承的振动轨迹和频谱特性

由 3 种箔片动压气体止推轴承的振动信号可以看出,黏弹性支承型止推轴承和鼓泡型止推轴承的轴心轨迹近似椭圆形,非常清晰,而平箔型止推轴承的轴心轨迹稍显凌乱.在轴向振动方面,鼓泡型止推轴承表现最令人满意,其轨迹清晰规律,并且振动频率以 1 倍频为主,低频和高频涡动可以忽略不计.黏弹性支承型止推轴承的轴向振动较为清晰,但存在较为明显的低频涡动.平箔型止推轴承的轴向振动不太规律,并且同时存在明显的低频涡动与高频涡动.综合以上分析,可以得出 3 种箔片动压气体止推轴承的稳定性能:平箔型具有较好的稳定性能;黏弹性支承型具有很好的稳定性能;鼓泡型具有非常好的稳定性能.

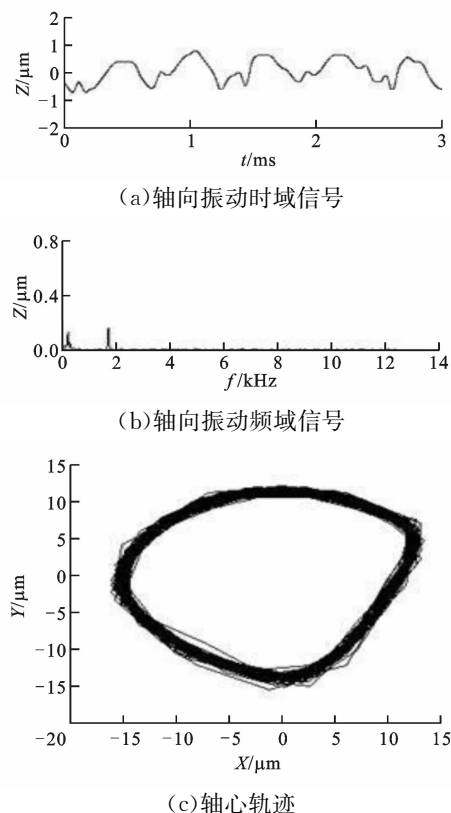


图6 黏弹性支承型止推轴承的振动轨迹和频谱特性

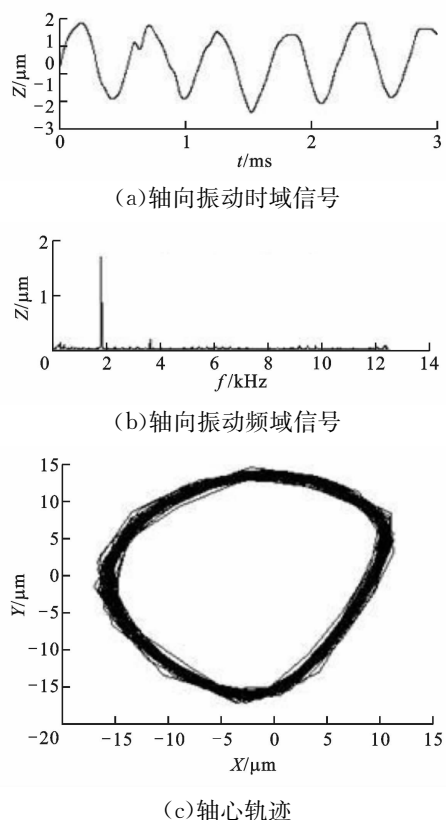


图7 鼓泡型止推轴承的振动轨迹和频谱特性

3 结 论

目前,国外已有箔片动压气体止推轴承成功应用于高速透平机械,如波箔型和悬臂型,由于这些轴承的结构较为复杂,对其机理认识不够以及受加工制造水平的限制,因此国内还没有开发出实用的箔片动压气体止推轴承.针对国内箔片动压气体止推轴承的研究现状,本文先后对3种结构简单、符合国内加工水平、具有自主知识产权的箔片动压气体止推轴承进行了系统研究.本文介绍了这3种止推轴承的结构特点,它们的几何结构都很简单,其中黏弹性支承型的几何结构最简单.另外,对箔片动压气体止推轴承的试验系统及研究也做了简单叙述,并比较了3种止推轴承的承载力试验及稳定性试验结果.这些结果表明:平箔型动压气体止推轴承具有最高的轴向承载力,鼓泡型动压气体止推轴承具有非常好的稳定性能.由于对泡型动压气体止推轴承只进行了初步的探索试验,对其结构和材料还没有进行深入探讨和分析,因此对鼓泡型动压气体止推轴承的进一步研究,将推动箔片动压气体止推轴承在国内高速旋转机械中的应用.

参考文献:

- [1] 熊联友,王瑾,刘井龙,等.平箔式箔片止推气体轴承静特性的理论研究[J].润滑与密封,2002(2): 2-3.
XIONG Liangyou, WANG Jin, LIU Jinlong, et al. Analytical study of plate foil thrust gas bearings [J]. Lubrication Engineering, 2002(2): 2-3.
- [2] 熊联友,陈纯正,王瑾.平箔动压止推气体轴承的试验研究[J].润滑与密封,2002(1): 36-37.
XIONG Liangyou, CHEN Chunzheng, WANG Jin. Experimental study of plate foil thrust gas bearings [J]. Lubrication Engineering, 2002(1): 36-37.
- [3] 林韶宁,姚艳霞,朱朝辉,等.新型弹性箔片动压气体止推轴承启停性能的研究[J].润滑与密封,2005(1): 28-30.
LIN Shaoning, YAO Yanxia, ZHU Zhaohui, et al. The start-stop performance study of a new aerodynamic foil thrust gas bearing with elastic support [J]. Lubrication Engineering, 2005(1): 28-30.
- [4] 周权,侯予,崔明现,等.新型弹性箔片动压气体止推轴承的理论研究[J].西安交通大学学报,2006,40(9): 1032-1035.

ZHOU Quan, HOU Yu, CUI Mingxian, et al. Analysis of new aerodynamic complaint foil thrust gas bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40 (9):1032-1035.

[5] 侯予,熊联友,王瑾,等. 低温透平膨胀机用全动压气体轴承的设计与试验研究 [J]. 深冷技术, 2002(1): 6-9.

HOU Yu, XIONG Liangyou WANG Jin, et al. Design and experimental study of self-acting gas bearings for cryogenic turboexpanders [J]. Cryogenic Technology, 2002(1): 6-9.

[6] 陈汝刚,周权,刘烨,等. 新型箔片动压止推气体轴承承载特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(9):54-58.

CHEN Rugang, ZHOU Quan, LIU Ye, et al. Experimental study on load capacity for new aerodynamic foil thrust gas bearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(9):54-58.

[7] 陈汝刚,周权,侯予. 微小型高速透平径向箔片动压气体轴承的研究 [J]. 润滑与密封, 2010,35(10):13-17.

CHEN Rugang, ZHOU Quan, HOU Yu. Studies of self-acting journal foil gas bearing for miniature high speed turbo-expander [J]. Lubrication Engineering, 2010,35(10):13-17.

(编辑 管咏梅)