

DOI: 10.7652/xjtuxb201403015

多层弹性支承箔片动压气体径向轴承 稳定性的实验研究

赖天伟¹, 马斌¹, 郑越青^{1,2}, 侯予¹, 陈双涛¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 621900, 四川绵阳)

摘要: 为了保证轴承支承高速转子的稳定运行,提出了一种具有多层弹性支承结构的新型箔片动压气体轴承。该轴承采用两层或多层具有鼓泡状凸起阵列的金属箔片作为弹性支承结构,通过调整鼓泡阵列的周向和轴向截距或调整上下层弹性箔片布置,可以实现轴承支承刚度特性和阻尼特性的调节。在直径为 25 mm 主轴的高速(10 万 r/min)透平膨胀机上,实验研究了这种箔片轴承支承高速转子的运转特性,详细分析了 3 种典型排列方式下转速与压力的关系,以及高速转子升速及降速特性。结果表明:采用不同的多层结构排列方式,可以有效调整和改善弹性箔片轴承支承高速透平转子的刚度和阻尼特性,抑制高速转子的不稳定涡动;多层弹性箔片轴承能够产生多重刚度及多重阻尼,从而改进了传统箔片轴承刚度和阻尼的影响,改善了弹性箔片动压气体轴承的稳定性和可靠性。

关键词: 箔片气体轴承;动压轴承;多层结构;稳定性

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0079-05

Experimental Investigation on Stability of Multi-Decked Protuberant Foil Gas Journal Bearing

LAI Tianwei¹, MA Bin¹, ZHENG Yueqing^{1,2}, HOU Yu¹, CHEN Shuangtao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: A kind of new hydrodynamic gas foil bearing with multi-decked elastic supporting structure was proposed for the stable operation of the high speed rotor supported by gas foil bearing. In this kind of foil bearing, double or multi layers of protuberant foils with projection array are adopted as the supporting structure, and the bearing stiffness and damping characteristics adjustments can be realized through changing the pitch of spherical crown in the peripheral and axial directions as well as the arrangement of the supporting foils. The experimental investigation on the high speed rotor supported by the new foil bearing was conducted on a high speed turboexpander with the rotor diameter of 25 mm. The relations between rotor speed and supply pressure, and the feature of the rotor speed-up and speed-down processes using three typical arrangement modes were analyzed. The test results show that the stiffness and damping characteristics can be adjusted and improved effectively by adopting

收稿日期: 2013-05-24。 作者简介: 赖天伟(1982—),男,博士生;侯予(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金委员会、中国工程物理研究院联合基金资助项目(11176023);中国科学院低温工程学重点实验室开放课题资助项目(CRYO201226);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-12-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131219.1121.004.html>

different foil arrangement modes for the rotor supported by elastic foil bearing, and the unstable wobble can be suppressed. In addition, stiffness and damping effect in conventional gas journal bearing may be improved by introducing multiple stiffness and damping characteristics generated in the multi-decked structure of elastic foil bearing, leading to a better stability and reliability of the present hydrodynamic gas foil bearing.

Keywords: gas foil bearing; hydrodynamic bearing; multi-decked structure; stability

箔片动压气体轴承在高速透平机械,如透平膨胀机、涡轮增压机、离心式压缩机和微型燃气轮机^[1-2]中广泛应用。采用柔性表面和弹性支承结构作为承载元件的箔片动压气体轴承,其弹性支承结构直接决定着轴承的静态和动态特性,因此设计和选用合适的支承结构及支承方式,对于保证轴承支承高速转子的稳定运行具有非常重要的意义。

传统的箔片动压气体轴承存在着阻尼和刚度单一的缺陷,为了提高轴承的性能,国内外研究人员在箔片轴承弹性支承结构的改进方面做了大量的研究工作,内容包括采用弹簧作为弹性支承元件,不同载荷下多级弹性支承结构的刚度调节,铜丝网结构下弹性支承结构的稳定性,多层卷曲箔片的支承结构,弹性橡胶支承结构在 17 mm 主轴逆布雷顿循环制冷机上的实验研究,铜丝支承材料特性对弹性箔片轴承稳定性的影响,采用全金属结构的单层弹性鼓泡型箔片轴承^[3-10]。

本文在单层弹性鼓泡型箔片轴承的基础上^[10-11],提出了多层弹性支承的改进结构。弹性支承箔片采用球冠状凸起阵列作为支承点,顶层平箔在流体动压下产生弹性形变,上层鼓泡箔片的形变为轴承提供了额外的形变量,各层箔片之间相对滑动产生的结构阻尼有利于提高轴承的稳定性。针对多层弹性支承箔片轴承的上述特点,通过实验着重研究了该轴承应用于高速透平的稳定性特性。

1 多层弹性支承箔片轴承的基本结构

弹性支承箔片的结构参数见表 1,多层弹性支承箔片轴承的原理如图 1 所示。两层弹性鼓泡支承箔片的凸起面朝向顶层平箔,下层弹性支承箔片为中间层箔片提供弹性支承点,中间层弹性支承箔片利用自身的弹性形变为箔片轴承提供更多的形变量。在装配上,多层弹性支承箔片可以提供一定的预载荷,可为变形留有空间。在运行中,弹性结构能够吸收外部冲击,保证轴承可靠运行。

多层弹性支承箔片轴承中,鼓泡相对位置有多种组合方式,3 种典型的鼓泡位置结构如图 2 所示。

表 1 弹性支承箔片的结构参数

参数	数值	参数	数值
轴向截距 S_a /mm	4	周向截距 S_p /mm	4
顶层平箔厚度 T_i /mm	0.07	弹性支承箔片高度 H_p /mm	0.2
弹性支承箔片厚度 T_p /mm	0.05	球冠状突起球半径 R_{ps} /mm	0.7

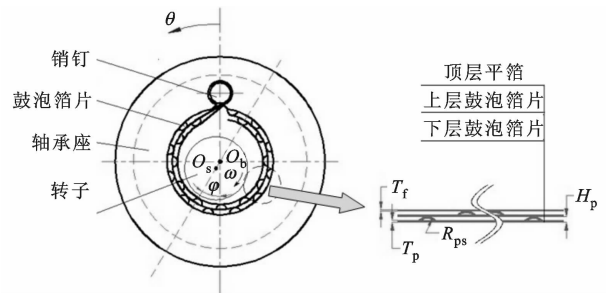


图 1 多层弹性支承箔片轴承原理图

图中 S_{pu} 和 S_{au} 分别表示上层鼓泡箔片的周向和轴向节距, S_{pb} 和 S_{ab} 分别表示底层鼓泡箔片周向和轴向节距。

采用周向叉排、轴向顺排(简称周叉轴顺,见图 2a)方式,轴向上鼓泡位置处的刚度较高,两排鼓泡之间的顶箔形变较大,顶箔与转子之间的气流间隙增大有利于启停阶段摩擦热散失;采用周向叉排、轴向叉排(简称周叉轴叉,见图 2b)方式,鼓泡箔片上下两层交叉布置,上层弹性支撑箔片形变较大,轴承表面形变较为均匀;采用周向顺排、轴向叉排(简称周顺轴叉,见图 2c)方式,周向上鼓泡位置处的刚度较高,有利于周向鼓泡位置处形成小的楔形空间,启

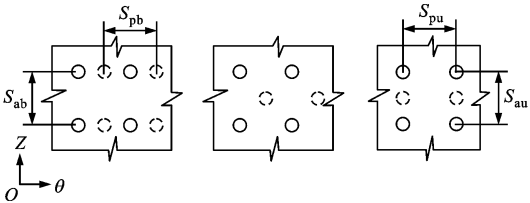


图 2 3 种典型的鼓泡位置结构

停阶段承载力增强。

2 多层弹性支承箔片轴承的特点

相比于单层箔片轴承,多层弹性支承鼓泡箔片轴承的特点如下。

(1)在轴承的启停阶段,转子与箔片之间会产生一定的摩擦热,多层弹性支承结构的间隙比单层箔片轴承的大,有利于避免摩擦热的积聚。

(2)多层鼓泡轴承箔片之间会产生相对运动和形变,各层鼓泡箔片之间的相对滑移和形变有利于增加库伦阻尼和结构阻尼,可以抑制转子涡动。另外,多层鼓泡轴承的结构简单,易于加工和装配,易于施加预载荷。

(3)多层结构的表面刚度和结构特性良好,有利于轴承启停,抵抗冲击力强。多层弹性支承动压径向气体箔片轴承具备了一般箔片动压径向气体轴承的吸收振动能力强、稳定性高等优点。

3 实验系统和方法

高速透平膨胀机轴承性能实验台如图 3 所示。实验系统主要由透平膨胀机、电气比例阀、过滤器和数据采集存储工控机组成。实验中高压空气由 75 kW阿特拉斯螺杆压缩机提供,供气压力最高达 1.15 MPa,标准工况下最高流量为 $600\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。



图 3 高速透平膨胀机轴承性能实验台

高速透平膨胀机是在西安交通大学研制的制氧机用透平膨胀机(PLK-8.33×2/20-5)的基础上改造而成,该透平机包括转子、径向轴承、止推轴承、壳体、喷嘴环、蜗壳等。表 2 列出了高速透平膨胀机的主要技术参数。透平膨胀机经中压透平改造后可工作在 50 000~110 000 r/min 之间,透平膨胀机进气由手动阀调节。采用单排静压小孔为止推轴承供气,以平衡透平轴向力,止推气膜间隙为 30 μm 。静压止推轴承压力控制装置为 SMC ITV3050-214N 电气比例阀。实验用径向轴承的实物如图 4 所示。

表 2 高速透平膨胀机的主要技术参数

参数	数值	参数	数值
风机轮直径/mm	60	工作轮直径/mm	36.5
主轴直径/mm	25	止推轴承内径/mm	28
止推轴承外径/mm	44	转子长度/mm	250.5
转子质量/g	830	轴承座内径/mm	25.94

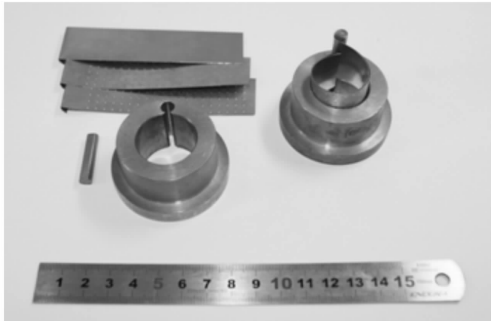


图 4 实验用箔片径向轴承

4 实验结果与分析

同一轴承在名义半径间隙为 0 的情况下,通过改变上下层弹性支承鼓泡箔片的相对位置关系,开展了轴承稳定性的实验研究,得到了供气压力与转子转速之间的关系和升降速瀑布图。

4.1 供气压力与转子转速的关系

在高速透平膨胀机中,升降速运行要求平稳,因此对透平膨胀机中弹性支承元件的性能提出了更高的要求。同一供气压力下,透平膨胀机的转速可以反映轴承在气膜厚度和摩擦力矩方面的特性。升速过程中,3 种鼓泡相对位置下透平膨胀机的转速与供气压力之间的关系如图 5 所示。从图 5 可以看出,透平膨胀机升速和降速过程并不重合,同一供气压力下的降速过程中转速明显高于升速过程。另外,为了保证转子的顺利起飞,升速过程较快,因此升速过程中供气压力-转速曲线较陡;为了实现转子的平稳着陆,降速过程较为缓慢,供气压力-转速曲线较为平缓。启动过程中,顶箔与支承箔片的摩擦力会阻止气膜间隙增大,从而增大了转子的启动力矩;降速过程中,摩擦力会阻止气膜间隙减小,在较大气膜间隙下摩擦力矩较小,此时转子具有较高的转速。测量时由于瞬态过程及启动过程较快,因此最低的稳定速度在 60 000 r/min 左右,而降速过程中最低的稳定转速在 30 000 r/min 左右。鼓泡相对位置采用周叉轴顺方式,转子的起飞转速较高,而在启动过程中同一供气压力下转子的转速较低;鼓泡

相对位置采用周顺轴叉方式,转子在升速时情况良好,但在降阶时转速较低;鼓泡相对位置采用周叉轴叉方式,升速和降速时的转速均比较高。

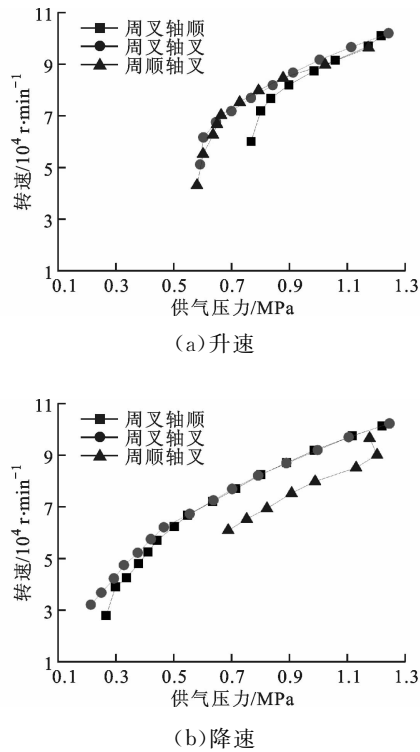


图 5 升降速过程中 3 种鼓泡相对位置下透平膨胀机转速与供气压力之间的关系

4.2 振动特性分析

为了评价不同结构下轴承的稳定性,本文分析了轴承的升降速瀑布图及振动信号的时域和频域特性。周叉轴叉方式下轴承的升降速瀑布图如图 6 所示。从图 6 可以看出:在升速过程中,可显示的最低转速为 51 330 r/min,振幅大约为 5 μm ,低速时低频涡动较小;转速升高到 80 000 r/min 时低频涡动出现,但是低频涡动幅值相对于主频振幅较小。在高转速下,主频振幅最大值达到 24 μm ,最高转速达到 102 363 r/min。在降速过程中,低频振幅相对于主频振幅较小,与升速过程类似,降速过程中的最低转速为 25 228 r/min。由此可见,整个过程中低频涡动较小,低频涡动的频率基本稳定,振幅有所增大,但相对于主频振幅仍然较小。本文中转子的一阶临界转速为 70 000 r/min,但是整个过程中的振幅未出现较大的变化,说明具有柔性表面的轴承可以抑制轴承的振动,使转子顺利通过临界转速,同时低频涡动较小。

最高转速下转子的振动信号如图 7 所示。从图 7 可以看出:X 方向振幅的最大值在 25 μm 左右,Y

方向振幅的最大值在 20 μm 左右,主频对应的转速为透平膨胀机运行的最高转速;在最高转速下,轴承的轴心轨迹清晰规则,说明高转速下透平膨胀机运行平稳。

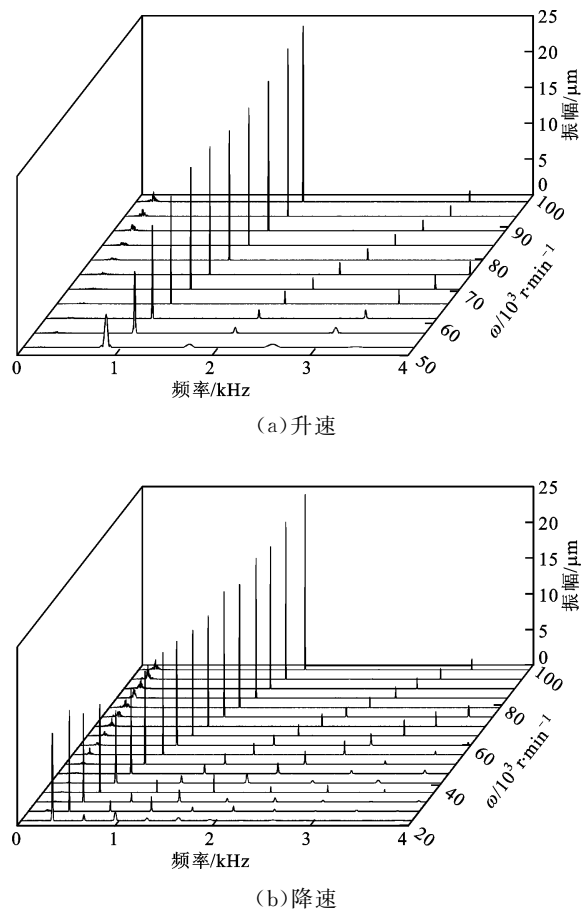


图 6 周叉轴叉排列方式下降降速瀑布图

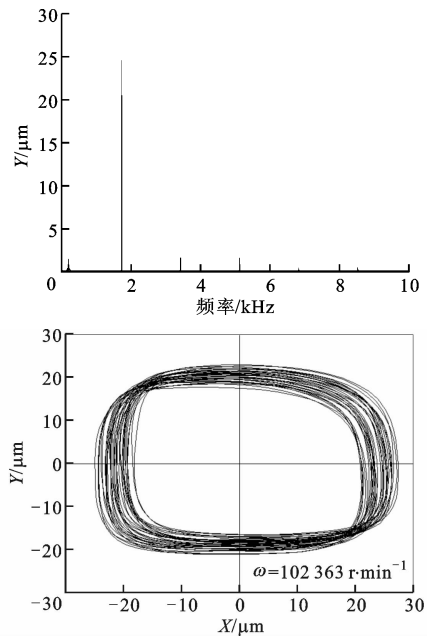


图 7 最高转速下转子的振动信号

由于篇幅的限制,本文仅给出了周叉轴叉排列方式下轴承的运行特性,其他方式下轴承的振动特性与周叉轴叉方式类似。

5 结 论

本文通过实验研究了多层弹性支承结构对箔片轴承高速稳定性的影响。通过合理调整多层弹性支承箔片轴承中箔片的结构参数,采用周叉轴叉排列方式的刚度和阻尼特性较好,升降速过程中低频涡动较小。这种支承结构可以较好地抑制次同步涡动,实验中最高转速达到 102 363 r/min。本文理论研究的不足之处将在后续工作中予以开展。

参考文献:

- [1] 朱朝辉,熊联友,侯予,等. 弹性箔片动压气体轴承在高速透平机械中的应用 [J]. 深冷技术, 2002(2): 6-9.
ZHU Zhaohui, XIONG Lianyou, HOU Yu, et al. Application of aerodynamic foil bearings in high speed turbomachinery [J]. Cryogenic Technology, 2002(2): 6-9.
- [2] AGRAWAL G L. Foil air/gas bearing technology: an overview, 97-GT-347 [R]. New York, USA: ASME, 1997.
- [3] SONG J, KIM D. Foil gas bearing with compression springs: analyses and experiments [J]. ASME Journal of Tribology, 2007, 129(3): 628-639.
- [4] KIM T H, ANDRES L S. Analysis of advanced gas foil bearings with piecewise linear elastic supports [J]. Tribology International, 2007, 40(8): 1239-1245.
- [5] LEE Y B, KIM T H, KIM C H, et al. Suppression of subsynchronous vibrations due to aerodynamic response to surge in a two-stage centrifugal compressor with air foil bearings [J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 428-434.
- [6] ANDRES L S, CHIRATHADAM T A, RYU K, et al. Measurements of drag torque, lift-off journal speed, and temperature in a metal mesh foil bearing [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(11): 112503.
- [7] FENG K, KANEKO S. Thermohydrodynamic study of multiwound foil bearing using Lobatto point quadrature [J]. ASME Journal of Tribology, 2009, 131: 021702
- [8] HOU Y, XIONG L Y, CHEN C Z. Experimental study of a new compliant foil air bearing with elastic support [J]. Tribology Transactions, 2004, 47(2): 308-311.
- [9] HOU Y, ZHU Z H, CHEN C Z. Comparative test on

two kinds of new compliant foil bearing for small cryogenic turbo-expander [J]. Cryogenics, 2004, 44(1): 69-72.

- [10] HOU Y, CHEN S T, CHEN R G, et al. Numerical study on foil journal bearings with protuberant foil structure [J]. Tribology International, 2011, 44(9): 1061-1070.
- [11] 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 Rugong, 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.

[本刊相关文献链接]

- 马斌,孙皖,赖天伟,等. 波箔箔片动压气体轴承的实验研究. 2014,48(1):118-122. [doi:10.7652/xjtuxb201401020]
- 周权,侯予,陈汝刚. 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. 2012,46(11):49-52. [doi:10.7652/xjtuxb201211010]
- 付雷,丰镇平. 毫米级微型燃气轮机系统设计原则与可实现性循环分析. 2011,45(5):42-46. [doi:10.7652/xjtuxb201105008]
- 陈双涛,侯予,陈汝刚,等. 高速透平膨胀机临界转速的计算与分析. 2010,44(9):33-37. [doi:10.7652/xjtuxb201009007]
- 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试验研究. 2010,44(9):54-58. [doi:10.7652/xjtuxb201009011]
- 陈汝刚,侯予,陈纯正. 微型气浮轴承高速透平膨胀机的研制. 2010,44(1):61-65. [doi:10.7652/xjtuxb201001014]
- 景敏卿,刘恒,沈园,等. 新型挤压膜气体轴承的研究. 2008,42(7):799-802. [doi:10.7652/xjtuxb200807003]
- 陈汝刚,侯予,袁秀玲,等. 低温透平制冷机的静压气体润滑轴承研究. 2007,41(7):792-796. [doi:10.7652/xjtuxb200707009]
- 杨利花,李辉光,虞烈. 可倾瓦动压气体轴承动态特性的频率效应. 2007,41(3):330-333. [doi:10.7652/xjtuxb200703015]
- 王林忠,侯予,崔明现,等. 箔片轴承结构阻尼的评价. 2006,40(1):40-44. [doi:10.7652/xjtuxb200601010]
- 马石磊,马求山,王琳,等. 高速动静压轴承支承主轴系统动特性测试研究. 2011,45(5):52-58. [doi:10.7652/xjtuxb201105010]
- 刘显军,洪军,朱永生,等. 多支承轴系轴承受力与刚度的有限元迭代计算方法. 2010,44(11):41-45. [doi:10.7652/xjtuxb201011009]

(编辑 苗凌)