

DOI: 10.7652/xjtuxb201407001

掌上透平弹性箔片动压气体轴承的试验研究

陈汝刚, 席光, 陈韬

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了满足微小型高速透平稳定、可靠运转的要求,设计研制了一种以精密机加工制作为目的的微小型箔片气体轴承,提出了以弹性鼓泡支承的新型波箔结构,其中箔片元件由表面光滑的平箔和半球型鼓泡突起体的弹性底箔组成,鼓泡箔片可采用单层鼓泡或多层鼓泡,多层鼓泡的第一层鼓泡在第二层鼓泡的跨距中央。在一台主轴轴径为 6 mm 的掌上高速透平上首次进行了振动特性及稳定性试验,结果表明:新型鼓泡箔片轴承具有良好的阻尼特性,对转子不稳定涡动的抑制能力较强;鼓泡自身变形具有调节刚度和阻尼的特点;在全动压条件下,试验透平稳定运转达到近 36 万 r/min。

关键词: 高速透平;箔片轴承;弹性鼓泡支承;气体轴承;动压

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0001-04

Miniature Aerodynamic Elastic Foil Gas Bearing for Palm-Sized High Speed Turboexpander

CHEN Rugang, XI Guang, CHEN Tao

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

Abstract: To meet the operation requirement of miniature high speed turbo-machinery, a new type of compliant aerodynamic foil gas bearing manufactured by conventionally precise machining is developed, where the foil configuration is composed of smooth top foil and elastic bump foil with series of hemispherical convex dots. This kind of bump foil contains one layer or multilayer structure. For multilayer structure, the convex dots on the first layer are set on the middle of span of second layer convex dots. This foil bearing is firstly applied to a palm-sized high speed turboexpander with shaft diameter of 6 mm, and an experiment on a high speed gas bearing turboexpander test rig is conducted to examine the vibration characteristic and stability. It indicates that the proposed foil bearing is endowed with fine damping performance to restrain unstable whirling. The hemispherical convex dots on the foil are able to adjust foil stiffness and damping by the self-deformation. The maximum rotational speed of the tested palm-sized turboexpander reaches 360 000 r/min.

Keywords: high speed turboexpander; foil bearing; elastic bump with hemispherical convex dots; gas bearing; aerodynamic

弹性箔片轴承是近 30 多年来动压气体轴承中
发展最为迅速的,相对于刚性表面动压气体轴承而

言,最大的特点在于该轴承采用弹性的支承表面,柔
性变形裕度较大,能够根据转速和载荷的变化产生

适应性变形来调整工作气膜间隙,具有良好的自我调节适应性^[1]。常用的箔片轴承类型有波箔型、悬臂型等,这类轴承中顶箔可提供光滑的轴承表面,并在转轴与光滑顶箔之间的微小间隙中建立流体动压气膜,而波纹状的波箔提供的阻尼有助于抑制流体动压不稳定性。波箔轴承通常应用于尺寸较大的透平,由于波箔结构复杂,以及利用很薄的金属片很难构成微小的精密波箔,使得轴承箔片微型化难以实现^[2]。以微小型高速透平发展为目标,开发研制以精密机加工制作的微小型箔片气体轴承成为热点。熊联友等人开发和改进了平箔型箔片动压气体轴承,并进行了系统的试验研究,且成功地应用于小型低温透平膨胀机中^[3]。陈纯正等提出并开发了一种采用弹性橡胶支承的箔片动压气体轴承^[4],并取得了较好的成果,但考虑弹性橡胶在高温下容易变形失效,其发展及应用仍受到了一定的限制。国外研究者也开发了不同结构形式(如金属网式)的箔片轴承^[5-6],但基本用于转子尺寸较大的场合,目前应用于轴径 10 mm 以下的微小型箔片气体轴承鲜见报道。本文针对所研制的掌上高速透平,提出了一种以精密机加工制作的具有半球形鼓泡弹性支承的径向箔片轴承新结构,开发了轴径 6 mm 的微小型箔片动压气体轴承,并在 6 mm 轴径的掌上透平上进行了探索性试验研究,对振动特性和稳定性进行了初步测试和分析。试验表明,所提鼓泡箔片轴承结构简单,依靠鼓泡自身变形可调节轴承的刚度和阻尼特性。在全动压条件下,试验透平稳定运转达到 35 万 r/min 的良好结果。

1 新型鼓泡弹性支承箔片径向动压气体轴承结构

图 1 为新型鼓泡箔片径向气体轴承的基本结构。该轴承组件包括轴承座及箔片元件等,箔片元件由表面光滑的平箔和具有一定尺寸的半球型鼓泡突起体的弹性底箔组成,其中鼓泡箔片可以采用单层鼓泡型或多层鼓泡型。对于多层鼓泡型,两层鼓泡相互交错,即第一层鼓泡在第二层鼓泡的跨距中央。轴承上有一条箔片卡槽,装配时将箔片元件的一端插入卡槽中并逆转子旋转方向使箔片以切向方式卷曲进入轴承座内,这样箔片与轴承内壁能更好地贴合。与转轴表面接触的最里面的平箔面为轴承面,底箔提供弹性支承。在卡槽的端部,紧固螺钉通过垫块将嵌入卡槽中的箔片一端压紧。轴承外侧有 2 个环形槽,其上加装了 2 个 O 形橡胶圈,以提高轴

承运转的稳定性;轴承上有若干散热孔。轴承刚度由鼓泡的尺寸、直径、高度及箔片的材料和厚度决定。

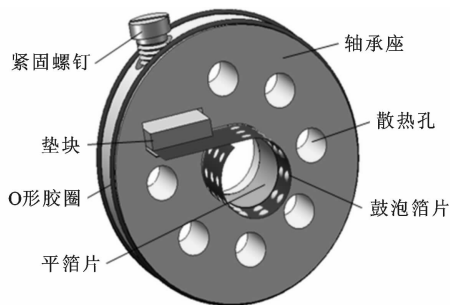


图 1 新型鼓泡箔片径向气体轴承的基本结构

新型鼓泡型箔片轴承主要依靠半球形的鼓泡形成弹性支承,通过改变半球形鼓泡的数量和结构即可改变轴承的刚性。箔片加工要求较高,箔片上的鼓泡应均匀布置并具有相同的高度和球度,因此箔片加工时的模具需要专门设计。图 2 为试验用转子轴承组件。为了减轻启停时的干摩擦,转子轴承表面分别镀有类金刚和类石墨的耐磨涂层。

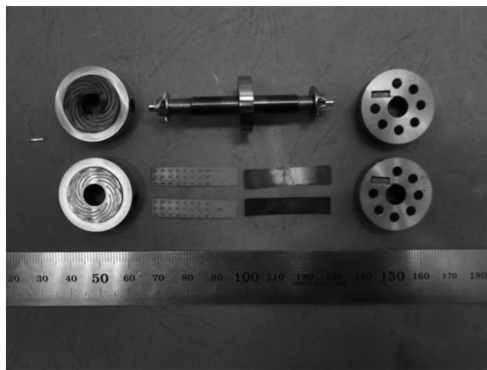


图 2 转子轴承组件

2 试验装置及方法

本试验在微小型高速气体轴承透平试验台上进行,旋转试验中的驱动透平是一台设计转速为 30 万 r/min 的微小型高速透平,如图 3 所示。高速透平轴承系统中,止推盘在转子中间,双跨支承,主轴直径为 6 mm。测试中,新型鼓泡箔片动压气体轴承在沿圆周方向上布置了 8 排半球鼓泡,沿轴承长度方向上每排布置 3 个鼓泡,轴承长径比为 1。转子由气体透平驱动,采用反动式叶轮。

用丙酮对试验主轴、箔片元件和轴承座进行清洗,将鼓泡箔片和平箔片沿逆转子转动方向依次装入轴承座,选择合适的工装对箔片元件进行定形处理,最后进行微型透平装配。选取合适的垫片厚度



图 3 微小型高速透平

来调整透平的轮背间隙、止推间隙以及工作轮与内扩压器的轴向间隙。在止推盘中间布置一对正交的电涡流位移振幅传感器,用于测量转子轴承系统的振动特性;通过调整测振头与止推盘之间的距离,使之处于标定的线性量程范围。利用转速传感器从风

机轮侧的紧固螺钉上测取键相信号,以反映真实的转速信息。试验时先对轴运动轨迹监测软件进行初步设置,以记录原始试验数据。打开透平进气阀,逐步调节比例调节阀的开度,增大透平进气压力,使转子达到动压起浮状态,然后减小进气阀开度,使转子在一定转速下起浮运转。转子停止运行是通过逐步减小供气阀门开度使转速逐渐下降实现的,当转速下降到 8 万 r/min 时,关闭进气阀门,转子即可停止运行。

3 试验结果及分析

通过观察测试信号的时域波形可以发现振动系统响应随时间的变化,通过观察轴心轨迹可以了解转子的运行状态。图 4 分别给出了鼓泡箔片轴承在不同转速下的轴心轨迹。由图 4 可知:转子在低速区运行时,轴承的阻尼性能较差,轴心轨迹呈现出很

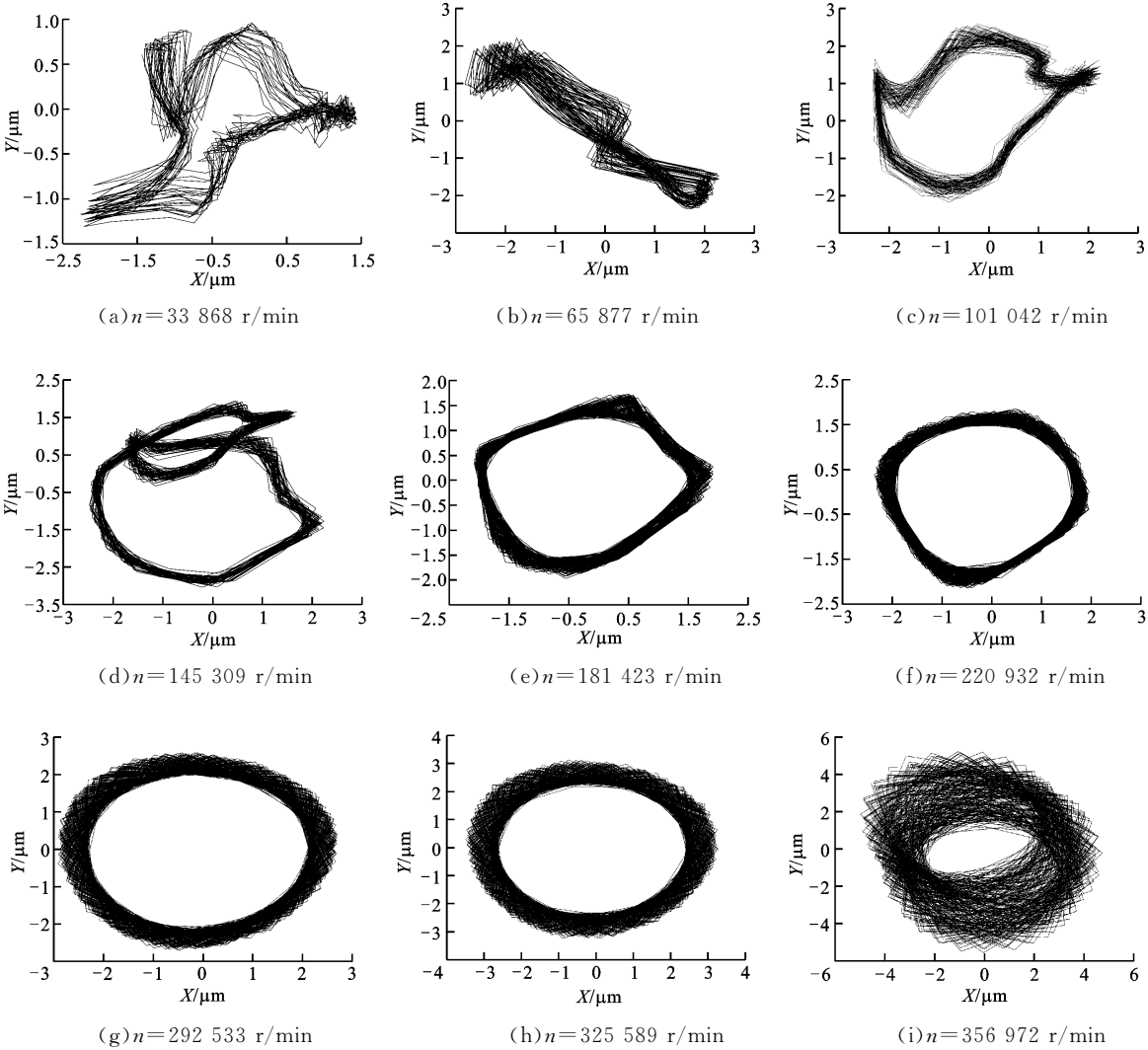


图 4 鼓泡箔片轴承在不同转速下的轴心轨迹

不规则的扭曲形状,所以轴心轨迹发散,转子振幅较大;随着转速的提高,弹性鼓泡的阻尼特性抑制了转子的振动,且振幅降低并保持基本不变,轴心轨迹呈现出具有清晰边界的椭圆形封闭曲线;转速持续提高,转子动平衡受到影响,转子低频涡动出现,转子振幅再次加大。

为了进一步分析各振动频率的影响,将图4转速下的频域波形图迭置,由此得到转子升速瀑布图,图中各转速下的一倍频、二倍频、三倍频用直线联结,如图5所示。由图5可知,在转子升速过程中,振动频率的一倍频分量总是占优,次同步分量不显著,振幅较小,表明低频和低频涡动分量被有效控制。

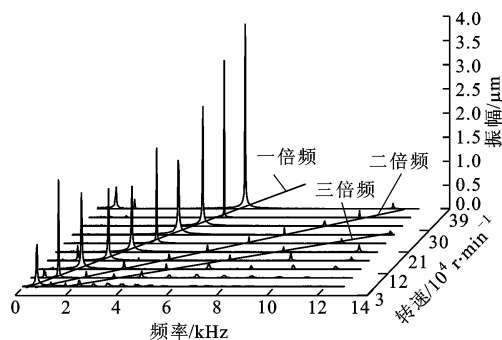


图5 转子升速瀑布图

4 试验结论

针对一台轴径为6 mm的掌上微型高速透平研制、开发了以精密机加工制作的具有切向卷入的鼓泡型箔片径向动压气体轴承,并在高速气体透平试验台上进行了运转测试和分析。试验结果表明:新型鼓泡箔片径向动压气体轴承具有良好的稳定性;在转子升速过程中,轴承的振动频率的一倍频分量占主导,次同步分量不显著,低频和低频涡动被有效控制,表明弹性鼓泡具有刚度可调和多重阻尼特性。新型鼓泡箔片轴承的柔性表面具有较好的自对中性,对轴承间隙和装配偏差敏感。试验研究表明,采用新型鼓泡型箔片径向动压气体轴承的微型透平在设计转速为30万r/min时能稳定运转,且最高转速接近36万r/min(超速约20%),显示该轴承在微小型高速透平中具有良好的实用价值和开发应用前景,对其进一步研究将推动箔片动压气体轴承在高速透平上的应用。

参考文献:

[1] HAYASHI K, HIRASATA K, HOTTA M, et al.

Development of aerodynamic foil bearing for micro gas turbine [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: C, 2006, 72(4): 1329-1336.

[2] KIM D, CREARY A, CHANG S S, et al. Mesoscale foil gas bearings for palm-sized turbomachinery: design, manufacturing, and modeling [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(4): 2502.

[3] XIONG L Y, WU G, HOU Y, et al. Development of aerodynamic foil journal bearings for a high speed cryogenic turboexpander [J]. Cryogenics, 1997, 37(4): 221-230.

[4] HOU Y, XIONG L Y, WANG J, et al. The experimental study of aerodynamic plate-foil journal bearings for high speed cryogenic turboexpander [J]. Tribology Transactions, 2000, 43(4): 681-684.

[5] ANDRES L S, CHIRATHADAM T A. Metal mesh foil bearing: effect of motion amplitude, rotor speed, static load, and excitation frequency on force coefficients [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(12): 122503.

[6] ANDRES L S, CHIRATHADAM T A. A metal mesh foil bearing and a bump-type foil bearing: comparison of performance for two similar size gas bearings [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 102501.

[本刊相关文献链接]

陈汝刚,陈韬,龚超.箔片动压止推气体轴承流固耦合数值模拟.2014,48(5):72-77.[doi:10.7652/xjtuxb201405013]

赖天伟,马斌,郑越青,等.多层弹性支承箔片动压气体径向轴承稳定性的实验研究.2014,48(3):79-83.[doi:10.7652/xjtuxb201403015]

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]

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]

(编辑 苗凌)