

文章编号 1004-924X(2014)12-3354-06

## 均压槽对空气静压轴承微振动的影响

陈 琦<sup>1,2\*</sup>, 陈 斌<sup>1</sup>, 蔡黎明<sup>2</sup>

1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘要:** 由于空气静压轴承工作过程中的微振动制约了它在超精密设备中的应用, 本文对空气静压轴承的动态特性进行了实验分析, 并提出用带均压槽的结构设计来解决上述问题。运用有限元软件对空气静压轴承进行仿真, 得到了空气静压轴承的各项性能参数。分析了微振动产生的原因并提出在空气静压轴承工作表面增加均压槽来有效抑制空气静压轴承的微振动的方法。通过实验对提出方法进行了验证, 结果显示计算结果与实验具有较好的一致性。实验表明通过增加均压槽的方式可以将轴承微振动降低 80%, 有效地提高了空气轴承的稳定性和运行精度。本研究为抑制空气轴承微振动和提高整个机床设备精度做出了有益探索。

**关键词:** 空气静压轴承; 均压槽; 微振动

**中图分类号:** TH133.36 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142212.3354

## Effect of equalizing groove on small vibration of aerostatic bearings

CHEN Qi<sup>1,2\*</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, CAI Li-ming<sup>2</sup>

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  2. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)
- \* Corresponding author, E-mail: chenqi@ciomp.ac.cn

**Abstract:** As the very small vibration of an aerostatic bearing limits its applications in ultra-precision machining, this paper analyzes experimentally the dynamical characteristics of the aerostatic bearing and proposes a structure design with an equalizing groove to solve the problem mentioned above. To realize the mechanical characteristics of aerostatic bearings, the analytical model was set up by using the finite element analysis software FLUENT and the performance parameters of the aerostatic bearing were obtained. The mechanism for the occurrence of small vibration was analyzed and the methods to add an equalizing groove on the surface of the aerostatic bearing to reduce the small vibration were proposed. The experiments were performed to verify the proposed method and the results show that the experiment results are good consistent with the analysis results. It indicates that the small vibration can be successfully suppressed by 80% with the proposed equalizing groove, which improves the

收稿日期: 2014-04-16; 修订日期: 2014-05-08.

基金项目: 国家重大科研仪器设备开发专项基金资助项目 (No. 61227901)

stability and operation accuracy of the aerostatic bearing and is a useful exploring for suppressing the small vibration of aerostatic bearings and improving the accuracy of whole machine tool.

**Key words:** aerostatic bearing; equalizing groove; small vibration

## 1 引 言

空气静压轴承由于具有摩擦力小、无磨损、运动平稳等特点,已成为机床设备的重要元器件,并在越来越多的领域得到了应用<sup>[1]</sup>。为满足精密及超精密设备日益发展的需求,人们对气体静压轴承定位精度及定位稳定性的要求也越来越严格<sup>[2]</sup>。空气静压轴承的超低摩擦系数是由一定厚度的气膜保证的,因此,气膜的刚度和阻尼都比较低<sup>[3]</sup>,气膜中气体流速的非均匀性会导致空气静压轴承有微振动现象。目前关于空气静压轴承微振动的起因及改善措施的研究有很多<sup>[4]</sup>,比如一些机构和学者针对气体静压导轨抗干扰能力较差的特性,提出了增加油式阻尼器的方案,成功地抑制了工作台的定位噪声<sup>[5]</sup>,但由于同时引入了油润滑,使其在一些超精密特殊环境的应用受到限制。也有一些专家提出具有高刚度及高阻尼的新型空气静压导轨<sup>[6]</sup>,他们利用多孔质材料的微结构,将导轨的工作间隙设计为 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ ,使空气静压导轨的刚度达到 $400\ \text{N}/\mu\text{m}$ ,另有一些专家从雷诺数上解释气浮工作台的微振动及其抑制方法<sup>[7]</sup>。还有一些学者用数学方法求解稳态雷诺方程和扰动雷诺方程,在此基础上,计算出了轴承静承载力和静刚度及动刚度和阻尼系数,并对轴承的稳定性进行了分析,最终,确定了气体静压轴承工作的稳态边界<sup>[8]</sup>。综上所述,对于空气静压轴承动静态特性的研究已经很普遍<sup>[9-10]</sup>,但对均压槽对其微振动特性影响的研究较少,这方面只有关于改变均压槽表面积实现空气静压轴承高刚度的研究<sup>[11-14]</sup>。

本文对空气静压轴承的动态特性进行了有限元及实验分析。在有限元软件 FLUENT 中对涡流进行仿真,基于上述结果,提出在空气静压轴承的原有结构上加入均压槽的设计方案。通过实验验证可知,均压槽能有效抑制空气静压轴承的微振动。

## 2 空气静压轴承稳态特性分析

为分析空气静压轴承的特性,首先应当求解

雷诺方程,然而由于精确求解雷诺方程相当困难,故发展了许多近似方法。包括在一定条件下对雷诺方程进行简化求解,以及将有限差分法、有限元法、边界元法应用于气体轴承研究中。目前利用有限元法求解雷诺方程可以适用于各类复杂轴承,具有应用方便的特点,正得到越来越多的重视。但小间隙求解时常用的迭代法(如 Newton-Raphson 法)不易收敛。因此,本文选择在有限元软件 FLUENT 中分析求解空气静压轴承特性。

### 2.1 空气静压轴承几何参数

分析中所使用的矩形止推空气静压轴承的结构如图 1 所示,其参数及环境条件如下:空气轴承的工作面积为 $80\ \text{mm}\times 80\ \text{mm}$ ,小孔孔径为 $d=0.2\ \text{mm}$ ,气膜间隙为 $h=0.015\ \text{mm}$ , $D=4\ \text{mm}$ ,深 $H=0.1\ \text{mm}$ ,大气压力为 $0.1\ \text{MPa}$ ,环境温度为 $T=293\ \text{K}$ ,供气压力为 $p_s=0.4\ \text{MPa}$ 。气体动力黏度 $\eta=1.84\times 10^{-5}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ,气体常数为 $R=288\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

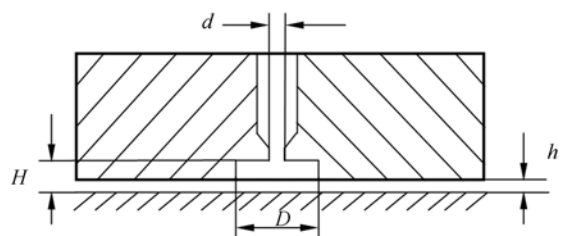


图 1 数值分析用的矩形空气静压止推轴承结构

Fig. 1 Structure of rectangular aerostatic thrust bearing for numerical analysis

### 2.2 空气静压止推轴承数学模型

静压止推空气轴承中气体的实际流动情况较为复杂,为简化计算,需要进行以下条件假设:

- (1) 轴承面与止推盘表面均为理想平面;
- (2) 整个流动过程中气体为连续体;
- (3) 整个流动过程为等温过程、层流稳态运动。

在模拟中,涉及到好几个方程,包括能量方程、连续性方程、动量方程、湍流方程和切向速度方程等<sup>[18]</sup>。为精确计算气体的润滑力学特性并保证数值分析收敛,在 FLUENT 中根据建立的

边界三维模型进行了四边形网格划分。其中节流孔处的局部网格划分如图 2 所示。模拟中采用湍流模型,黏度发热,设置进、出口处的边界条件分别为 pressure-inlet 和 pressure-outlet;采用具有较高收敛效率的 SIMPL 算法计算;在流场的数值模拟中采用二阶迎风格式,计算过程中根据收敛情况适当地中止迭代,并修改松弛因子值以加快收敛速度。

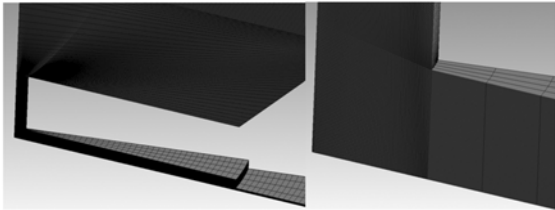


图 2 空气静压止推轴承网格模型及边界

Fig. 2 Mesh data and boudaries of aerostatic thrust bearing

2.3 数值模拟分析结果

图 3 为承载能力的数值模拟分析结果及理论值,由图 3 可知,经过计算得到的整个空气轴承的承载能力与理论值基本一致<sup>[18]</sup>,从而验证了数值模拟结果的正确性。

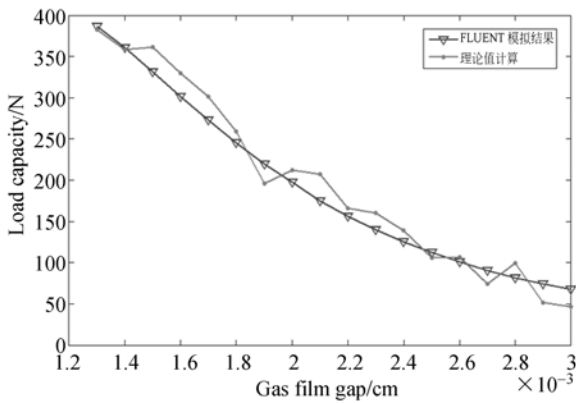
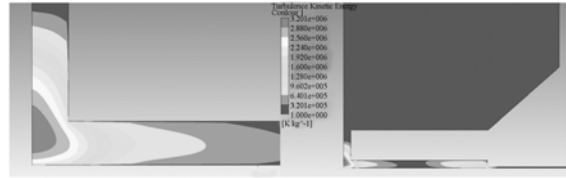


图 3 FLUENT 模拟得到的承载能力结果与理论值的对比

Fig. 3 Comparison of FLUENT simulated load capacity and theoretical results

图 4 为涡流能量分布图,从图 4(a)中可以清晰地观察到整个流动过程中压缩气体发生了 2 次涡流:第一次是经过小孔节流器后,由于导轨面的存在,使流动方向发生了 90°变化,从而产生涡流;第二次是在压缩气体进入正常静压气膜处,由于压力的突然升高造成涡流。图 4(b)、4(c)显示

了 2 次涡流的能量值,节流器处的涡流能量较为明显。



(a) 主体涡流分布

(a) Distribution of main eddy

(b) 节流器末端

(b) At the end of orifice energy



(c) 工作气膜间隙入口处

(c) At the inlet of working gas

图 4 涡流能量分布

Fig. 4 Distribution of overall eddy energy

涡流的位置、大小及规模会影响整个空气静压轴承的纳米级微观振动特性,其响应频率与流速对应,属于高频响应,在目前精密及超精密设备中应极力避免。为降低由涡流引起的空气静压轴承的微振动,本文对空气静压轴承的结构进行了优化。参考中国计量学院王茜等几位专家的研究成果<sup>[19]</sup>,为空气静压轴承增加了如图 5 所示的均压槽。结合现有的加工、实验条件,选定均压槽尺寸为 0.2 mm×0.08 mm。对有均压槽的空气静压轴承进行 FLUENT 仿真,边界条件与前面一致。增加均压槽后的涡流能量分布如图 6 所示,由图 4 和图 6 可知,具有均压槽的空气静压轴承的涡流现象得到明显改善,气体在进入静压工作间隙前的涡流也明显减弱。

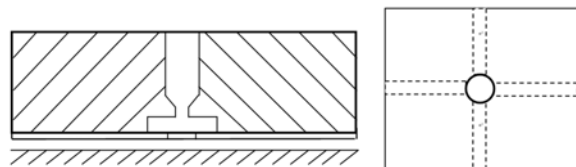


图 5 数值分析用的带均压槽空气静压止推轴承结构

Fig. 5 Structure of aerostatic thrust bearing with equalizing groove for numerical analysis

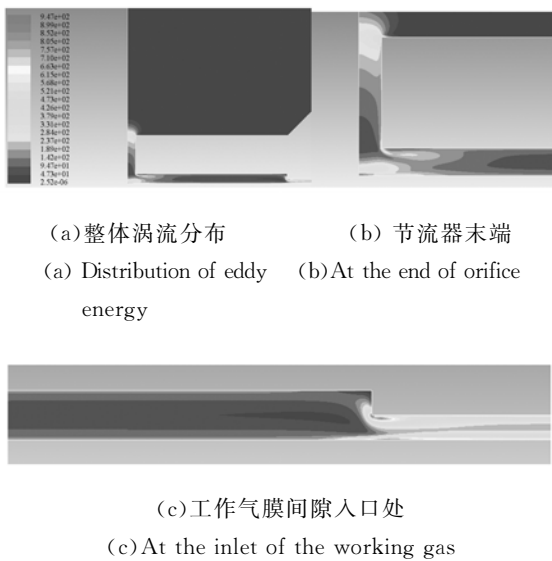


图 6 增加均压槽后的涡流能量分布

Fig. 6 Distribution of eddy energy with equalizing groove

### 3 实验分析

#### 3.1 实验原理

为验证均压槽对空气静压轴承静态稳定性的影响,设计了如图 7 所示的实验装置。该装置中,空气静压轴承被固定在一个刚性支座上,上表面为经过超精密研磨的高精度导轨面,在导轨面上的不同位置放置测量反射镜,并利用双频激光干涉仪测量导轨面上的纳米级振动。实验机构如图 7 所示,两个空气静压止推实验板中一个属于典型的小孔节流板,另外一块带有  $0.2\text{ mm} \times 0.08\text{ mm}$  的十字均布均压槽。在止推板安装时有限位装置,以保证止推板水平安装及其 Z 向自由度。

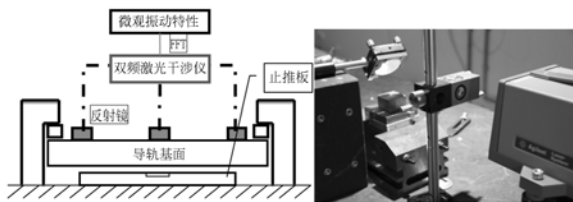


图 7 实验装置

Fig. 7 Structure of experimental device

#### 3.2 实验结果分析及讨论

在相同的环境条件下对两个不同的气体静压

轴承进行多次实验,测得多组曲线,通过多次测量发现,实验结果具有高度一致性,选取其中 2 组进行快速傅里叶变换(FFT),结果如图 8 所示。

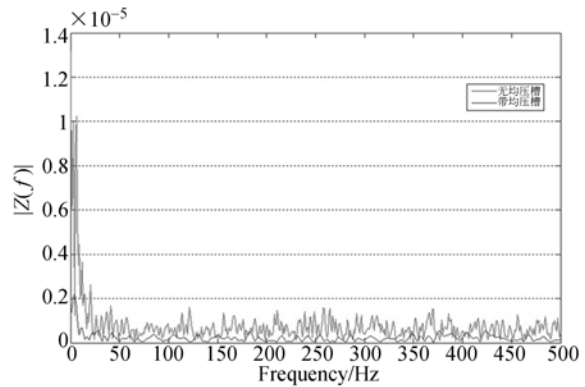


图 8 实验结果

Fig. 8 Experiment results

通过对两种形式的空气静压止推板的微振动进行比较发现,均压槽可以将空气静压止推板的微振动降低  $0 \sim 500\text{ Hz}$ ,微振动幅值降低了  $80\%$ 。

### 4 结 论

本文通过对空气静压轴承工作过程中的气体流动进行数值模拟分析,揭示了空气静压轴承工作时微振动的来源。基于数值模拟分析的结果,在空气静压轴承工作表面增加均压槽,最终通过实验进行了验证。数值模拟分析结果显示,空气静压轴承工作过程中涡流的产生主要与流动方向的骤变以及流体压力的骤升有关。由流体压力突变引起的涡流可以通过增加均压槽的方式进行改善。测试实验表明,均压槽可以有效地降低空气静压轴承因涡流引起的微振动,幅值降低约  $80\%$ ,另外选用 FLUENT 作为空气静压轴承流场仿真分析的工具,可以相对准确地给出流体流动的细节,通过分析流场可以发现轴承计算或工程设计中的问题,从而使工程设计与优化时对实验和经验的依赖性大为减少,并能够显著缩短设计周期、降低设计费用、提高设计可靠性。均压槽的优化设计及其对空气静压轴承稳定性产生的影响将是下阶段的主要研究内容。

## 参考文献:

- [1] 刘强,张从鹏. 直线电机驱动的 H 型气浮导轨运动平台[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10):1540-1546.  
LIU Q, ZHANG C P. H-type air-bearing motion stage driven by linear motors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15 (10):1540-1546. (in Chinese)
- [2] SHINNO H, HASHIZUME H, YOSHIOKA H, *et al.*. X-Y- $\theta$ -Nano-positioning table system for a motor machine [J]. *Annals of the CIRP*, 2004, 53 (1):337-340.
- [3] 张景和,张顺国,赵海潇,等. 大型超精密机床导轨卸荷系统结构与测试[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9):1382-1390.  
ZHANG J H, ZHANG SH G, ZHAO H X, *et al.*. Structure design and test for guide unloading system of large ultra-precision machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1382-1390. (in Chinese)
- [4] KAWAI T, EBIHARA K, Takeuchi Y. Improvement of machining accuracy of 5-Axis control ultra-precision machining by means of laminarization and mirror surface finishing[J]. *Annals of the CIRP*, 2005, 54(1):329-332.
- [5] 张山,王雷. 基于腹底式被动阻尼器抑制精密气浮工作台的定位噪声[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(12):2706-2711.  
ZHANG SH, WANG L. Suppression of positioning noise of precision air bearing stage based on abdominal and passive damper [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12):2706-2711. (in Chinese)
- [6] 王贵林,李圣怡,粟时平. 基于超精密应用的高刚度高阻尼空气静压导轨研究[J]. 航空精密制造技术, 2001, 37(6):1-5.  
WANG G L, L SH Y, L SH P. A study on aerostatic slider with high stiffness and high damping for ultra-precision applications [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2001, 37(6):1-5. (in Chinese)
- [7] 张鸣,朱煜,段广洪. 超精密气浮工件台的微振动及其抑制[J]. 设计与研究, 2005, (11): 47-49.  
ZHANG M, ZHU Y, DUAN G H. Micro-vibration of ultra-precision gas bearing linear motion stage and its elimination [J]. *Design and Research*, 2005, (11):47-49. (in Chinese)
- [8] 向洋,陈瀚,陈学东. 周期分布压力腔的小孔节流圆形静压气体轴承静动态特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2):115-120.  
XIANG Y, CHEN H, CHEN X D. Study of static and dynamic characteristics of a circular aerostatic bearing with periodic orifice restrictors and feed pockets [J]. *Journal of Wu Han University of Technology*, 2012, 34(2):115-120. (in Chinese)
- [9] SAWADA K, KAWAI T, EBIHARA K, *et al.*. Improvement of air bearing performance by means of laminarization and its application to ultra-precision micromachining [J]. *Proc. of the Euspen Topical Conference*, 2003, Aachen:61-64.
- [10] YOSHIMOTO S. Aerostatic thrust bearing with a self-controlled restrictor employing a floating disk [J]. *JSME International Journal Series C*, 1994, 37(2):369-375.
- [11] TOGO S. Study on externally pressurized gas bearings with infinite stiffness (2nd Report) [J]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 1996, 62(1):85- 89.
- [12] ZBYSZKO K. Gas bearing of in finite stiffness [J]. *Journal of Tribology*, 1992, 114 (2):270-273.
- [13] WANG CH CH, CH CH K. Bifurcation analysis of self-acting gas journal bearings [J]. *ASME Journal of Tribology*, 2001, 123(4):755-767.
- [14] 齐乃明,刘墩,谭久彬. 自主式静压气体轴承实现无穷刚度的条件分析[J]. 南京理工大学学报, 2001, 25 (2):147- 151.  
QI N M, LIU D, TAN J B. Conditions analysis approach to infinite stiffness for an active control aerostatic bearing [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2001, 25(2):147- 151. (in Chinese)
- [15] ZHANG J, YUAN L, FANG Z. A new type of aerostatic thrust bearing with high stiffness[C]. *International Technology and Innovation Conference 2006 (Advanced Manufacturing Technologies)*, Hangzhou: IET, 1996, 1367-1375.

- [16] 张君安,方宗德.空气轴承的弹性均压槽力学性能分析与测试[J].南京理工大学学报,2007,31(3):304-307.  
ZHANG J A, FANG Z D. Aerostatic thrust bearing annular membrane elastic pressure groove mechanics performance analysis and test [ J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007,31(3):304-307. (in Chinese)
- [17] 张君安,张文豪,廖波,等.具有可变均压槽的气体静压推力轴承性能研究[J].摩擦学学报,2009,29(4):329-334.  
ZHANG J A , ZHANG W H, LIAO B, *et al.* . A study on characteristics of air static pressure thrust bearing with variable-section pressure equalizing grove [J]. *Tribology*, 2009, 29(4):329-334. (in Chinese)
- [18] 刘瞰,刘育华,陈世杰.静压气体润滑[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.  
LIU D, LIU Y H, CHEN SH J. *Static Pressure Gas Lubrication* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1990.
- [19] 王茜,左培良,李东升.均压槽尺寸对空气静压导轨静态性能的影响[J].机械,2009,36(1):19-33.  
WANG Q, ZUO P L, LI D SH. Effect of pocket size on the aerostatic bearing static capabilities [J]. *Machinery*, 2009,36(1):19-33. (in Chinese)

## 作者简介:



陈 琦(1961—),男,山东苍山人,研究员,硕士生导师,1983年于天津轻工业学院获得工学学士学位,研究方向:精密机械、机械电子等。E-mail: chen-qi@ciomp.ac.cn



陈 斌(1958—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,1991年于吉林大学继续教育学院机械制造工艺与设备专业获得工学学士学位,主要从事超精密加工工艺的研究。E-mail: Chenbin5812@ yahoo.com

(版权所有 未经许可 不得转载)