

# 行波液体静压轴承浮力及其稳定方法的实验研究

李英杰<sup>1,2</sup> 周 明<sup>1</sup> 社本英二<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学机电学院, 哈尔滨, 150001; 2. 名古屋大学机械理工系, 名古屋, 464-8603)

**摘要:**提出了一种基于蠕动传输作用的新型行波液体静压轴承。首先基于行波液体静压轴承原理,建立了轴承原理验证装置。然后基于差动螺纹机构建立了轴承面倾斜调整机构,实现轴承的完全上浮。利用所开发的轴承验证装置,实验研究了行波液体静压轴承在上浮方向上有导轨时的轴承承载能力,证明了行波液体静压轴承及其稳定方法的可行性,并给出了驱动参数,例如:驱动电压和驱动频率,以及轴承间隙高度对轴承浮力稳态值的影响规律。

**关键词:**行波;静压轴承;轴承稳定;实验研究

**中图分类号:**TH117.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2014)05-0810-06

## Experimental Study on Floating Force and Its Steady Method for Liquid Bearing Utilizing Traveling Waves

Li Yingjie<sup>1,2</sup>, Zhou Ming<sup>1</sup>, Shamoto Eiji<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China;

2. Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464-8603, Japan)

**Abstract:** Liquid bearing utilizing traveling waves, which does not need external pressurized source while still achieving load capacity of conventional hydrostatic bearings, is a novel hydrostatic bearing based on peristaltic transport. Based on the innovative bearing principle, a prototype is developed. And its inclination adjustment apparatus employing differential screw is developed in order to make the bearing completely float. Experimental results reveal that the prototype successfully generates a steady periodic floating force with positive steady-state value. The feasibility of the bearing principle and its steady method by actively controlling transient bearing clearance height is confirmed by experiments. Experiments are also conducted to investigate the effect of driving parameters, such as driving voltage and frequency, as well as bearing clearance height on the steady-state value of floating force.

**Key words:** traveling waves; hydrostatic bearing; bearing stabilization; experimental study

液体润滑式非接触轴承具有运动精度高,摩擦因数低和承载能力大的显著优点,在精密及超精密机械领域,例如:精密及超精密加工设备,航空航天器,大型检测设备等等中,有着十分广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。当前,常见的液体润滑式非接触轴承主要包括两种类型:静压轴承和动压轴承。传统的静压轴承和动压轴承由于其轴承原理的限制,有着各自的应用局

限。静压轴承的承载能力不受轴承转速的影响。但是,其润滑油膜的产生需要外部供油装置持续地供给稳定的高压润滑油。因此,静压轴承的结构复杂、庞大,造价和运行费用较高。动压轴承不需要外部供油装置,因此其结构较为简单、紧凑。但是,动压轴承的承载能力受到轴承转速的影响,特别是在轴承的启动和停止阶段,轴承的滑动面发生机械

**基金项目:**国家高技术发展研究计划(“八六三”计划)(2012AA040405)资助项目;日本 THK 公司基金资助项目。

**收稿日期:**2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

**通信作者:**周明,男,教授,博士生导师,E-mail:zhouming@hit.edu.cn。

接触,摩擦加大,磨损剧烈<sup>[5]</sup>。为了结合两类非接触润滑轴承的优点,名古屋大学的社本英二<sup>[6-7]</sup>教授提出了一种基于蠕动传输作用的新型行波气体静压轴承,其轴承原理如图 1 所示。行波轴承可以被看成是一种利用蠕动传输作用,将微流体泵融入轴承间隙的新型静压轴承。这种轴承不需要外部供油装置,便于实现轴承的紧凑化和小型化;行波轴承可以在轴承滑动面在滑动方向上没有相对运动的情况下承载载荷,其承载能力不受轴承滑动面滑动速度的影响。

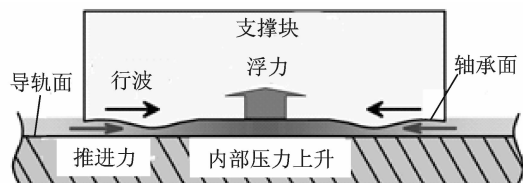


图 1 行波静压气体轴承的原理<sup>[5]</sup>

Fig. 1 Principle of gas bearing utilizing traveling waves

为了进一步扩大这种新型静压轴承的使用范围并提高轴承的承载能力,本文作者将这一轴承原理应用到液体静压轴承,提出了一种基于蠕动传输作用的新型行波液体静压轴承及其浮力稳定方法,并基于有限体积法建立了行波液体静压轴承的专用仿真模型,仿真结果证明了行波液体静压轴承的可行性<sup>[8]</sup>。之后,基于三明治夹层结构和薄片状压电陶瓷驱动器,李英杰等建立了行波液体静压轴承的原理验证装置,并实验研究了轴承的自由上浮性能<sup>[9]</sup>。实验结果表明:由于显著的倾斜,所建立的验证装置无法实现完全上浮。但是其平均上浮量可达数十个微米,显示出潜在的承载能力。为了进一步明确地验证所提出的液体行波静压轴承原理,本文在已建立的原理验证装置上,开发基于差动螺纹结构的精密倾斜调整机构,对原理验证装置在上浮方向上有导轨情况下的轴承承载能力进行实验研究。文中对不同工作参数下的轴承浮力和轴承振动进行实验研究,以确定驱动参数,例如:驱动电压和驱动频率,以及轴承间隙高度对轴承浮力的影响规律。为了提高所提出的轴承装置的精度,实验研究了通过主动控制轴承瞬时隙高度来抑制轴承浮力波动,减小轴承振动的轴承稳定方法。

## 1 实验装置

本文所使用的轴承原理验证装置如图 2 所示。其主要的尺寸如表 1 所示。实验装置基于三明治夹

层结构。每组 10 片压电陶瓷驱动器被分别布置在轴承的 4 个方向。压电陶瓷驱动器和支撑块被轴承上板和弹性轴承面夹持在中间。由于轴承上板和支撑块的厚度远大于弹性轴承面,在压电陶瓷驱动器垂直方向变形的影响下,弹性轴承面将会发生弯曲变形。通过合理地选择各片压电陶瓷驱动器上驱动信号的相位,可以使弹性轴承面上的弯曲变形向轴承内部传播,从而带动润滑油向轴承内部流动,形成润滑油膜,支撑载荷。支撑柱可以提高轴承强度,更重要的是:支撑柱可以吸收行波,从而避免轴承面上的残余振动,以提高轴承的精度。轴承润滑油为 BLUEBE LB-10,其运动黏度与水相似。

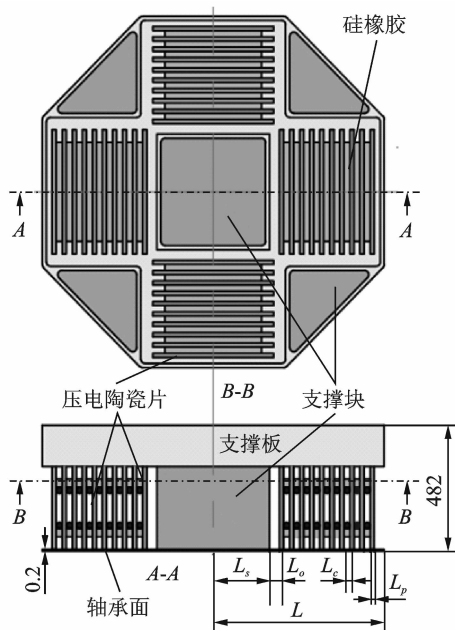


图 2 轴承原理验证装置结构图

Fig. 2 Schematic of proposed bearing device

表 1 轴承原理验证装置的主要几何尺寸

Tab. 1 Values of geometric parameters for proposed bearing device

几何尺寸	参数
轴承半宽度 $L$ /mm	43.5
支撑柱半宽度 $L_s$ /mm	13.0
过渡区长度 $L_o$ /mm	3.5
压电陶瓷片的厚度 $L_p$ /mm	1.0
压电陶瓷片的间隙 $L_c$ /mm	1.5
压电陶瓷片的片数 $n$	10

由于轴承自由上浮存在显著的倾斜<sup>[9]</sup>,必须在轴承上浮方向上设置导轨以确保轴承的完全上浮。为了模拟这一过程,本文开发了一种基于差动螺纹结构的轴承倾斜调整装置,并安装在超精加工中心

NIC-300 上,以利用其精密位移系统来精确的设定轴承间隙高度。所开发的差动装置轴承倾斜调整机构如图 3 所示。通过旋转差动螺纹装置,可以调整轴承面的倾斜度以保证轴承面平行于导轨面。通过移动加工中心的主轴可以精确地设定轴承间隙的高度,轴承驱动装置示意图如图 4 所示。首先,实时仿真器通过 Simulink 进行编程以产生  $\pm 5\text{ V}$  的小信号;之后,小信号通过高速电压放大器放大为  $\pm 150\text{ V}$  的驱动信号;最后,驱动信号送入轴承驱动压电陶瓷产生行波变形。

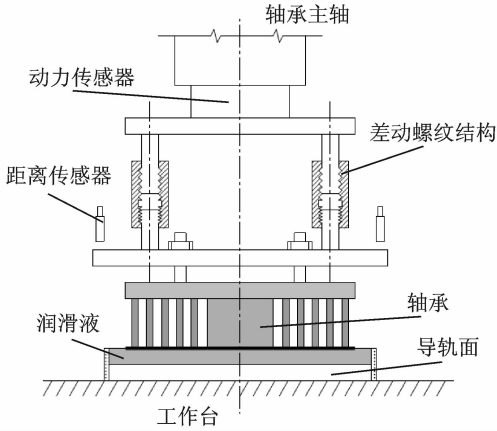


图 3 基于差动螺纹装置的轴承承载能力检测装置

Fig. 3 Test apparatus for load-carry capacity of proposed bearing device based on differential screw device

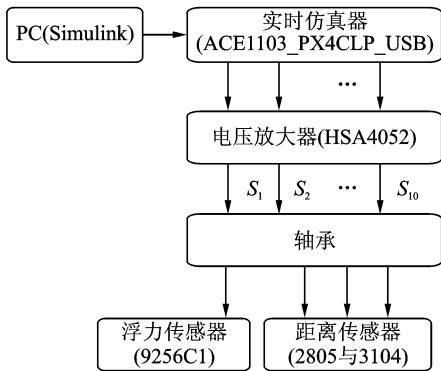


图 4 行波轴承驱动装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of driving apparatus for proposed bearing device

由于压电陶瓷为脆性材料,过于激烈的驱动电压变化有可能缩短轴承的使用寿命,并且对于轴承的稳定性不利。因此,驱动电压需要由零平滑地增长到其最大值

$$S_i = R(t)V_i \sin(2\pi ft + \varphi(i+1)) \quad (1)$$

式中: $V_i$  为行波驱动电压; $f$  为行波驱动频率; $\varphi$  为

行波驱动信号相位, $\varphi=120^\circ$ ; $i$  为压电陶瓷编号,由内轴承内测向轴承外侧逐渐增大; $R(t)$  为驱动电压平滑函数

$$R(t) = \begin{cases} 2\left(\frac{t}{t_s}\right)^2 & t \leq \frac{t_s}{2} \\ -2\left(\frac{t}{t_s} - 1\right)^2 + 1 & \frac{t_s}{2} < t \leq t_s \\ 1 & t > t_s \end{cases} \quad (2)$$

式中  $t_s$  为驱动信号过渡时间。

## 2 实验结果及其分析

### 2.1 典型轴承浮力

当驱动电压为  $\pm 50\text{ V}$ ,驱动频率为  $600\text{ Hz}$ ,轴承间隙高度预设为  $9.47\ \mu\text{m}$  时,行波液体静压轴承的轴承浮力如图 5 所示,轴承浮力的稳态值为  $16.43\text{ N}$ 。由于轴承浮力的上升,轴承整体存在一定的回退,如表 2 所示,其平均回退量为  $0.511\ \mu\text{m}$ ,因此轴承驱动时的实际轴承间隙高度为  $9.981\ \mu\text{m}$ 。由于轴承浮力存在波动,轴承的上板有一定的振动,对距离传感器 3104 所测得的数据进行 FFT 分析可得图 6。如图 6 所示,轴承上板存在大于  $16\text{ nm}$  的振动。

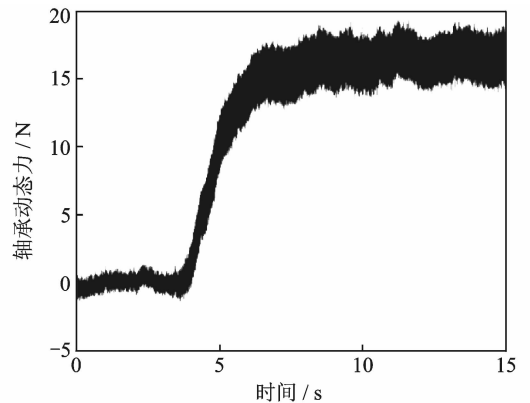


图 5 典型行波液体静压轴承的轴承浮力

Fig. 5 Typical floating force of proposed liquid bearing device

表 2 轴承上板的回退量

Tab. 2 Recession of support plate of proposed bearing device

	$\mu\text{m}$		
型号	2805 A	3104	2805 B
回退量	0.655	0.545	0.332

### 2.2 工作参数对轴承浮力的影响

本节将会讨论轴承驱动参数,例如:驱动电压和驱动频率,以及轴承间隙高度对轴承浮力稳态值的影响。

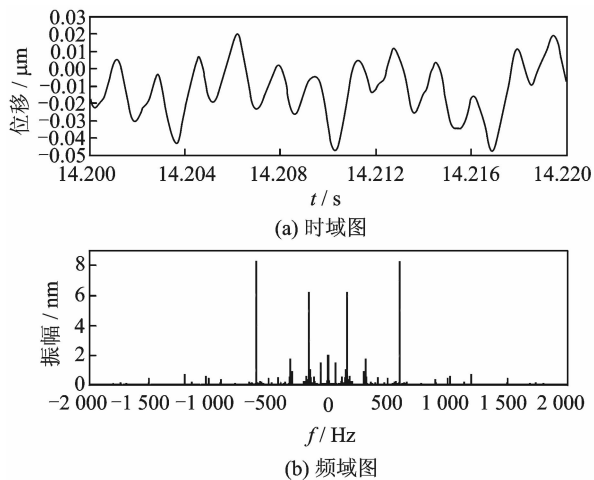


图 6 行波液体静压轴承上板振动的时频分析结果  
Fig. 6 Dominant harmonics of floating force of proposed liquid device

图 7 为不同驱动频率下的行波液体静压轴承的轴承浮力稳态值。此时,驱动电压为  $\pm 100$  V。如图 7 所示:轴承浮力与驱动频率大致呈线性关系。这主要是因为润滑油的不可压缩性导致轴承浮力与轴承间隙变化速率成正比。轴承间隙的变化速率与驱动频率成正比。但是在驱动频率或者轴承间隙较小时,轴承浮力随驱动频率上升的增速比线性关系时要小。这可能是因为:在轴承间隙较小时,轴承浮力较大。较大的轴承浮力引起了明显的轴承面回退。虽然在实验中,作者使用了距离传感器检测轴承上板的回退,但是由于被测面不是轴承面,实际的轴承间隙可能要比测得的轴承间隙更大。同时,轴承浮力较大时,轴承内部的润滑油压力也较大,从而阻碍压电陶瓷驱动器的变形能力,

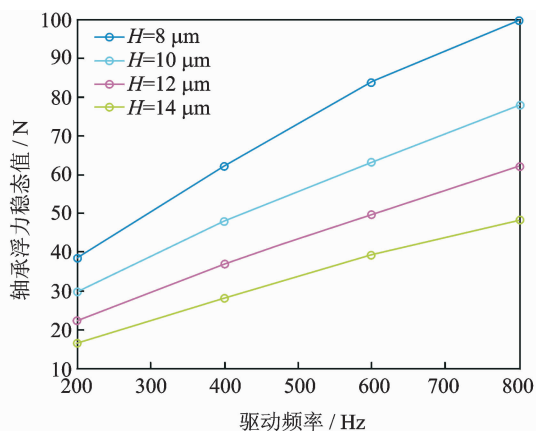


图 7 不同轴承间隙高度下驱动频率对轴承浮力稳态值的影响  
Fig. 7 Effect of driving frequency on floating force at different bearing clearance height

行波实际振幅减小。综上所述,轴承浮力在驱动频率较高或者轴承间隙较小时,轴承浮力随驱动频率上升的增速有所放缓。

图 8 为不同驱动电压下的行波液体静压轴承的浮力稳态值。此时,驱动频率为 600 Hz。如图 8 所示,轴承的浮力随着驱动电压的上升而增大,其增加速度逐渐增大。随着驱动电压的上升,行波振幅增大,轴承最小间隙减小,行波的润滑油输送速率上升,轴承内部的高压润滑油向外泄露的黏性阻力增大。

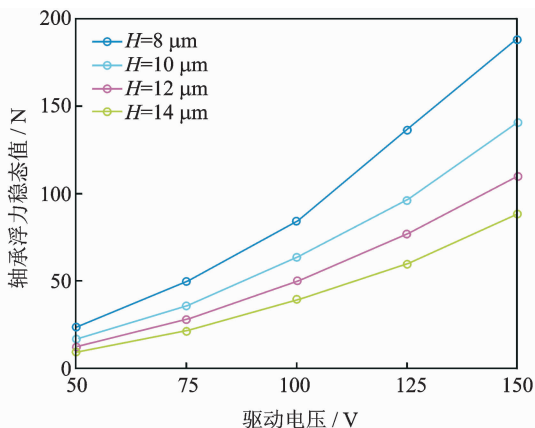


图 8 不同轴承间隙高度下驱动电压对轴承浮力稳态值的影响  
Fig. 8 Effect of driving voltage on floating force at different bearing clearance height

图 9 为不同驱动频率下,轴承间隙高度对行波液体静压轴承的浮力稳态值的影响。此时,驱动电压为  $\pm 100$  V。

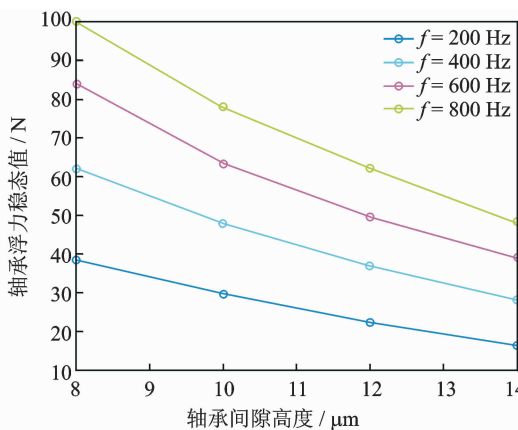


图 9 不动驱动频率下轴承间隙高度对轴承浮力稳态值的影响  
Fig. 9 Effect of bearing clearance height on floating force at different driving frequencies

图 10 为不同驱动电压下,轴承间隙高度对行波液体静压轴承的浮力稳态值的影响。此时,驱动

频率为 600 Hz。

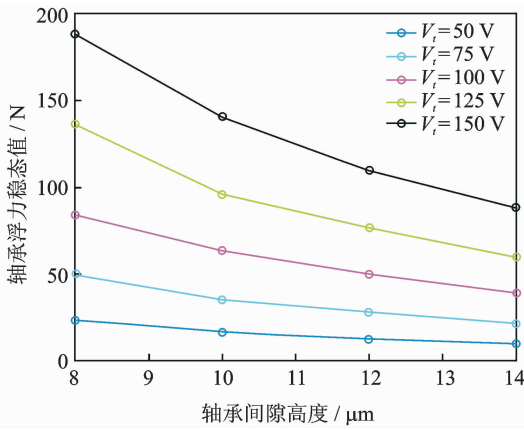


图 10 不动驱动电压下轴承间隙高度对轴承浮力稳态值的影响

Fig. 10 Effect of bearing clearance height on floating force at different driving voltages

如图 9,10 所示:轴承浮力随着轴承间隙高度的上升而减小,其减小的速度逐渐减小,这主要是因为随着轴承间隙减小时,轴承内部高压润滑油向外泄露的黏性阻力成指数地增大。在驱动频率或者驱动电压较大时,轴承刚度较大,且随着轴承间隙的减小,轴承刚度快速上升。这主要是因为:首先在较高的驱动频率或者较大的驱动电压下,行波的润滑油输送速率较大,轴承间隙单位高度变化带来的轴承浮力变化量较大;其次,液体流动的黏性阻力随轴承间隙的高度的减小成指数增大关系,轴承间隙较小时,轴承间隙的单位高度变化会引起更大的轴承浮力变化。

### 2.3 轴承浮力波动的稳定方法

如图 5,6 所示,由于行波液体静压轴承的轴承浮力存在明显的波动,从而造成轴承上板有着一定的振动,这一振动不利于所开发轴承的精密及超精密应用。为了抑制轴承的振动,本文提出了一种通过主动控制瞬时轴承间隙高度来抑制轴承振动的方法,被作者定义为“电压偏置法”。当轴承内部压力大于轴承浮力的稳态值时,轴承面主动地上升,轴承内部的高压润滑油流出轴承间隙的阻力下降,轴承浮力下降;当轴承内部压力小于轴承浮力的稳态值时,轴承面主动地下降,轴承内部的高压润滑油流出轴承间隙的阻力上升,轴承浮力上升。需要特别指出的是:这一稳定方法并不是通过直接移动轴承面的绝对位置来补偿轴承振动,而是通过调整瞬时轴承间隙高度来稳定轴承浮力,从而抑制轴承振动。

当驱动电压引入偏置电压时,驱动电压为

$$S_i = R(t) \left[ V_i \sin(2\pi ft + \varphi(i+1)) + \sum_{j=0}^m V_{c,j} \sin(2\pi(f_{c,j}t + \theta_j)) \right] \quad (3)$$

式中: $V_c$  为补偿振动的偏置电压; $f_c$  为补偿振动的驱动频率; $\theta$  为补偿振动相位; $j$  为补偿振动编号。

如式(3)所示,主驱动电压  $V_i$  产生行波变形以产生稳态波动的轴承浮力,偏置电压  $V_c$  产生补偿振动,以稳定轴承浮力。对图 5 所示的轴承浮力引入偏置电压(如表 3 所示),可以得到相对稳定的轴承浮力,如图 11 所示。对距离传感器 3104 所测得的数据进行 FFT 分析可得图 12。

表 3 偏置电压

Tab. 3 Offsetting voltages

No.	驱动频率/Hz	驱动电压/V	相位/rad
1	600	4.02	-0.810
2	1 200	0.20	1.433

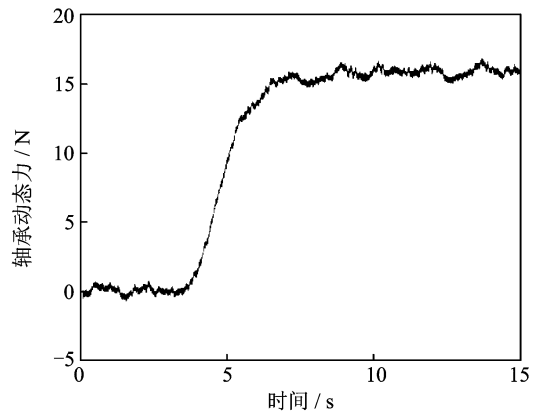


图 11 带有偏置电压的行波液体静压轴承的轴承浮力  
Fig. 11 Typical floating force of proposed bearing device with offsetting voltage

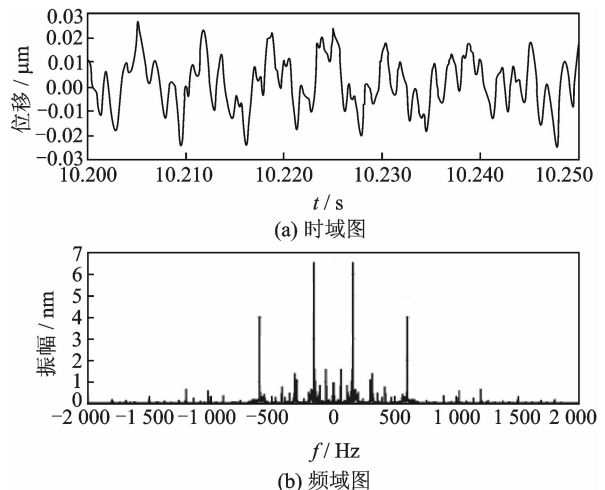


图 12 残余轴承振动的时频分析结果

Fig. 12 Dominant harmonics of residual fluctuation of floating force of proposed liquid device

如图 11,12 所示,轴承上板的振动减小到大约 8 nm。由本节的实验结果可以认为,电压偏置法对于降低行波液体静压轴承的浮力波动和减小轴承的振动有着十分显著的作用。但是由于偏置电压的调整精度有限,轴承浮力和轴承上板的波动没有完全消除。

### 3 结 论

本文对行波液体静压轴承在上浮方向有导轨情况下的轴承浮力和轴承振动抑制方法进行了实验研究。在大量的实验结果的基础上可以得到以下结论:

(1)轴承原理验证装置可以成功地产生显著的轴承浮力,证明了行波液体静压轴承的可行性。

(2)行波液体静压轴承的轴承浮力稳态值,与驱动频率成线性关系;随着驱动电压的上升而上升,且增速逐渐加快;随着轴承间隙高度的减小而上升,且增速逐渐加快。

(3)“电压偏置法”可以有效的降低行波液体静压轴承的浮力波动和轴承振动。

#### 参考文献:

[1] Zhang S J, To S, Wang H T. A theoretical and experimental investigation into five-DOF dynamic characteristics of an aerostatic bearing spindle in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013,71(8):1-10.

[2] Zhao S, Mojrzisch S, Wallaschekz J. An ultrasonic levitation journal bearing able to control spindle center position[J]. *Mechanical Systems and Signal Pro-*

*cessing*, 2013,36(1):168-181.

- [3] Takeuchi Y, Sakaida Y, Sawada K, et al. Development of a 5-axis control ultraprecision milling machine for micromachining based on non-friction servomechanisms [J]. *Annals of the CIRP*, 2000,49(1): 295-298.
- [4] Tomohiro S, Shigeka Y, Tadeusz S. Running performance of an aerodynamic journal bearing with squeeze film effect[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013,7(12):184-193.
- [5] Bouyer J, Fillon M. Experimental measurement of the friction torque on hydrodynamic plain journal bearings during start-up[J]. *Tribology International*, 2011,44(7/8):772-781.
- [6] Shamoto E, Suzuki N, Hamaguchi A. A new fluid bearing utilizing traveling wave [J]. *CIRP Annual-Manufacture Technology*, 2006,55(3):411-414.
- [7] Komatsu H, Kato T, Burak S, et al. Study on fluid bearing utilizing traveling waves development of modular piezoelectric traveling-wave actuator and precision slider[C]// *Proceedings of JSPE Spring Meeting*. Nagoya, Japan: Japan Society for Precision Engineering, 2010:1129-1130.
- [8] Li YingJie, Burak S, Shamoto E. Proposal and analysis of an innovative liquid bearing utilizing traveling waves[C]// *Proceeding by ICPT 2012*. Kaohsiung, Taiwan: International Conference on Positioning Technology, 2012:221-224.
- [9] Li YingJie, Burak S, Shamoto E. Study on floating characteristics of an innovative liquid bearing utilizing traveling waves [J]. *Key Engineering Materials*, 2013,579/580(9):25-29.

