

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201700242

## 多孔质空气静压主轴动态回转误差的影响机理分析

王伟<sup>1</sup>, 张敏<sup>1</sup>, 梅雄<sup>1</sup>, 崔海龙<sup>2</sup>

(1.电子科技大学 机械电子工程学院, 四川 成都 611731; 2.中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:**为了有效解决多孔质空气静压主轴回转误差在理论上无法定量精确求解的难题,提出了一种基于计算流体力学和动态网格技术的回转精度预测方法。首先根据实验测量数据分析规律采用频率和幅值相结合的方式对主轴转子的圆度误差进行几何建模,建立了不同波形、不同幅值下的几何模型。然后在FLUENT平台下利用动态网格技术,并采用瞬态分析方法同时求解N-S方程和牛顿运动定律,研究了不同波形、不同幅值下转子的 $XY$ 向受力、速度分布、压力分布、位移轨迹的变化规律,实现圆度误差对回转误差的影响规律研究。仿真结果表明:圆度误差是影响多孔质空气静压主轴回转误差的主要因素,回转误差随着误差幅值的增加而显著恶化,偶波造成的回转误差明显低于奇波误差,随波数的增加,回转误差降低。最后搭建高精度回转误差测量实验平台,对自行研制的多孔质空气静压主轴回转误差进行测量,测得回转误差为50 nm(其中包含垂直度、圆柱度、圆度等引起的回转误差),计算求得的圆度误差为23 nm占回转误差的46%,得出圆度误差是影响主轴回转精度的主要因素,也验证了所采用的回转误差分析方法的有效性和准确性。

**关键词:**多孔质;空气静压轴承;圆度误差;回转精度

**中图分类号:**TH132.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3246(2017)05-0191-08

### Influence Mechanism Analysis of Rotary Error on Porous Aerostatic Spindle

WANG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, MEI Xiong<sup>1</sup>, CUI Hailong<sup>2</sup>

(1.School of Mechatronics Eng.,Univ. of Electronic Sci. and Technol. of China,Chengdu 611731,China;

2.Inst. of Machinery Manufacturing Technol.,China Academy of Eng. Physics,Mianyang 621999,China)

**Abstract:** A prediction method based on computational fluid dynamic and dynamic mesh technology was proposed to solve the problem of the porous aerostatic spindle rotation error quantitatively accurate in theory. First of all, the geometric models with different waveform and amplitude were established according to the experimental data based on the frequency and amplitude of the spindle rotor roundness error. Then the N-S equation and Newton's laws of motion were solved to figure out the influence law of the roundness error on rotary error by FLUENT. The influence of the force of the  $XY$  direction, velocity distribution, pressure distribution and displacement trajectory of rotor with different waveforms and different amplitudes were studied, and the analysis of the influence law of roundness error on rotation error was achieved. The calculation results showed that the roundness error is the main factor of the rotary errors which deteriorates significantly with the increase of amplitude error and the rotary error caused by even wave is significantly lower than the odd wave. Finally, a high precision rotary error measurement experiment platform was set up to measure the rotation error of the porous aerostatic spindle. The measured rotation error is 50 nm (including the rotation error caused by vertical degree, cylindrical degree, roundness and etc.) and the calculated rotation error is 23 nm, accounting for 46% of the experimental date. It can be concluded that the roundness error is the main factor affecting the rotation accuracy of the spindle, and the validity and accuracy of the rotary error analysis method are also verified.

**Key words:** porous; aerostatic bearing; roundness error; rotation accuracy

随着工业的不断发展,超精密加工技术越来越能反应一个国家的工业发展水平。发展超精密切削

机床是超精密加工技术中的重要一环,超精密切削机床的加工精度直接影响到加工产品的质量<sup>[1-2]</sup>。而

收稿日期:2017-03-30

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金委员会资助项目(U1530130)

作者简介:王伟(1980—),男,教授,博士生导师。研究方向:数控机床精度检测。E-mail:wangwhit@163.com

空气静压主轴是实现超精密切削加工的重要运动部件,空气静压主轴的回转误差直接制约超精密切削机床加工精度的提升,主轴的回转误差会直接反映到加工零件的表面形貌上<sup>[3-5]</sup>。因此国内外研究人员致力于提升空气静压主轴回转精度的研究。

在早期的研究中,小孔节流形式的空气静压主轴由于涉及理论简单、制造工艺成熟得到了较多的关注。随着研究的不断深入,研究人员发现节流孔附近激波与边界层的相互作用形成的气旋将诱发轴承的自激振荡<sup>[6-8]</sup>。许多学者采用了更改节流腔形状、增加节流孔数量以及改变进口压力等方式依然不能有效解决这一问题<sup>[9-10]</sup>。随着材料科学的发展,多孔质这种新型材料受到了越来越多的关注,多孔质节流器表面具有成千上万的微小节流孔,使得轴承表面的压力分布变得更加均匀,可以有效减小小孔节流中存在的自激振动现象,因此多孔质节流器具有更加优越的节流效果和稳定性,多孔质节流方式为提高空气静压主轴的回转精度提供了新的可能性<sup>[11-13]</sup>。

Kosmynin等<sup>[14]</sup>开展了两排无腔圆柱轴承和多孔质轴承的回转精度对比实验,结果表明多孔质轴承静压主轴的回转精度比双排小孔轴承高16%~22%,验证了多孔质轴承在均匀流场方面具有独特的性能优势。Kim等<sup>[15]</sup>联立动态雷诺方程和牛顿动力学方程,研究了主轴回转误差的形成机理。Kashchenevsky等<sup>[16]</sup>将由轴承摩擦副误差产生的油膜扰动力用静刚度、动刚度和阻尼表示,基于牛顿动力学原理构造了回转精度的理论模型。孙方金<sup>[17]</sup>将轴承气腔分成与进气孔数量相同的“等效狭缝”,在圆周方向所有等效狭缝径向力的平衡条件共同决定了主轴轴心的位置。郑颖君等<sup>[18]</sup>将气膜简化为弹性单元,节流孔所在截面的气膜力系可转化为平面汇交力系,每一个节流孔相当于一个弹簧。同时,Kashchenevsky和孙方金等认为轴承几何形状误差对回转运动的影响与误差敏感方向有关<sup>[16-17]</sup>。Akira等<sup>[19]</sup>的进一步研究表明:误差运动与旋转件不圆度的误差分布有关。景岗等<sup>[20]</sup>同样发现人为回转误差主要是由转子和轴承本身的制造误差引起的,故提高轴承和转子的制造精度,可显著提升主轴回转精度。但是,到目前为止国内外研究者还不能在理论上对多孔质空气静压主轴的回转精度进行定量精确求解,更不能直接揭示误差均化机理的动态演化过程。

作者采用基于计算流体力学和动态网格技术的数值模拟方法,直接定量精确计算主轴转子圆度误差对主轴回转误差的影响规律,并揭示各相关物理参量在回转误差动态演化过程中的相互作用规律。首先,根据实验测量数据分析规律采用频率和幅值

相结合的方式对主轴转子的圆度误差进行几何建模。然后,在FLUENT平台下利用动态网格技术,并采用瞬态分析方法同时求解N-S方程和牛顿运动定律,实现圆度误差对回转误差的影响规律分析。最后,搭建高精度回转误差测量实验平台,对自行研制的多孔质空气静压主轴回转误差进行测量,验证了所采用的回转误差分析方法的有效性和准确性。

## 1 动态回转精度预测方法

### 1.1 计算流体力学理论

轴承间隙内的气体流动受物理守恒定律的支配,任何流动问题都必须满足质量守恒定律,该定律表示单位时间内流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。依据该定律得到质量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (1)$$

动量守恒定律也是气体在间隙内流动必须满足的基本定律,该定律表示微元体中流体的流动对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和,依据该定律导出动量守恒方程如式(2)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中, $\tau$ 为压力张量,其可以表示成:

$$\tau = \mu \left[ (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{v} I \right] \quad (3)$$

式(1)~(3)中, $p$ 为流体压力, $\tau$ 为压力张量, $\mathbf{v}$ 为气体流速, $\rho$ 为气体质量体积密度, $\rho \mathbf{g}$ 和 $\mathbf{F}$ 为重力体积力和外部体积力, $\mu$ 为分子黏性, $I$ 为单位张量(所有变量表示下同)。

气体流动伴随着热交换,满足能量守恒,微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热量加上体积力与表面力对微元体所做的功,因此能量守恒方程可以表示成:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla(\rho \mu T) = -\nabla \left( \frac{k}{c_p} \text{grad } T \right) + S_T \quad (4)$$

当气体以较大的压力经过多孔质节流器区域时,将出现局部紊流,多孔质内的气体压差与流量不再满足线性关系,需要根据Darcy-Forchheimer方程求解,如式(5)所示:

$$-\nabla p = \frac{\mu}{\alpha} \mathbf{v} + C_F \rho \mu u^2 \quad (5)$$

式中, $\alpha$ 为黏性渗透系数, $C_F$ 为惯性系数, $\mu$ 为气体黏度。

气体经过多孔质出口边界流入气膜间隙时存在速度滑移现象,这种现象可以由Beaver-Joseph方程求

解得到气体在边界处的流动规律,如式(6)所示:

$$\begin{cases} v_r = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} (z-h)(z + \frac{h}{3}\xi_0), \\ v_\theta = \frac{1}{2\mu r} \frac{\partial p}{\partial \theta} (z-h)(z + \frac{h}{3}\xi_1), \\ v_z = -\frac{\phi_z}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial z} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v_r$ 、 $v_\theta$ 、 $v_z$ 分别为气膜间隙内的 $r$ 、 $\theta$ 、 $z$ 方向的气体速度,  $h$ 表示轴承间隙,  $\xi_0$ 、 $\xi_1$ 分别为 $r$ 和 $\theta$ 方向的滑移参数。

通过联立求解以上的守恒方程、Darcy-Forcheheimer方程和滑移方程,可以得到气膜内的压力分布。

### 1.2 动网格技术

动网格技术实际上是利用牛顿第二定律求解刚体边界的加速度、速度,进而得到刚体边界的位移,从而控制网格移动。牛顿第二定律在动网格中表述如式(7)和(8)所示:

$$\int_{t_0}^t dv = \int_{t_0}^t \frac{F}{m} dt \quad (7)$$

$$v_t = v_{t-\Delta t} + \frac{F}{m} \Delta t \quad (8)$$

网格移动过程中,网格移动更新是以胡克定律为核心思想,网格移动与气膜力的关系如式(9)所示:

$$F_i = \sum_j^{n_i} k_{ij}(\Delta x_j - \Delta x_i), k_{ij} = -\frac{1}{\sqrt{|x_i - x_j|}} \quad (9)$$

式中,  $F_i$ 为节点 $i$ 的气膜力,  $x_i$ 和 $x_j$ 分别为节点 $i$ 和 $j$ 的位置,  $\Delta x_i$ 、 $\Delta x_j$ 为节点位置的变化量,  $k_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的弹性系数,  $n_i$ 与为节点 $i$ 与相邻的节点数。

主轴平动时,主轴边界上的节点按照胡克定律进行移动,通过气体内部节点传递至多孔质边界,传递过程中,为减小网格畸变程度,需要对主轴边界和孔质边界上的网格节点进行更新,更新方程见式(10):

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \beta \Delta x_i^m \quad (10)$$

式中,  $n$ 和 $n+1$ 为相邻迭代时间步的位置,  $\beta$ 为移动节点的松弛因子,  $m$ 为迭代次数。

流体内部节点满足受力平衡,气膜网格内部节点移动时,网格更新满足式(11):

$$\Delta x_i^{m+1} = \frac{\sum_j^{n_i} k_{ij} \Delta x_j^m}{\sum_j k_{ij}} \quad (11)$$

### 1.3 瞬态求解过程

瞬态求解过程是指对主轴实际运转过程中的受力及运动状态的变化进行求解一种过程。瞬态求解

过程中,只需要对方程中与时间有关的瞬态项进行处理,采用一阶向后差分处理式如式(12)所示:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi V)^{n+1} - (\rho \phi V)^n}{\Delta t}, \\ V^{n+1} = V^n + \frac{dV}{dt} \Delta t, \\ \frac{dV}{dt} = \int_{\partial V} u_g \cdot dA = \sum_j^{n_f} u_{g,j} \cdot A_j, \\ u_{g,j} \cdot A_j = \frac{\delta V_j}{\Delta t} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $n$ 和 $n+1$ 为当前时间和下个时间的物理参量,  $\frac{dV}{dt}$ 为控制体的体积微分,  $n_f$ 为控制体的面数量,  $A_j$ 为 $j$ 面的表面积矢量,  $\delta V_j$ 为在时间步长 $\Delta t$ 内控制面 $j$ 作用引起的体积变化量。整个回转误差求解过程如图1所示。

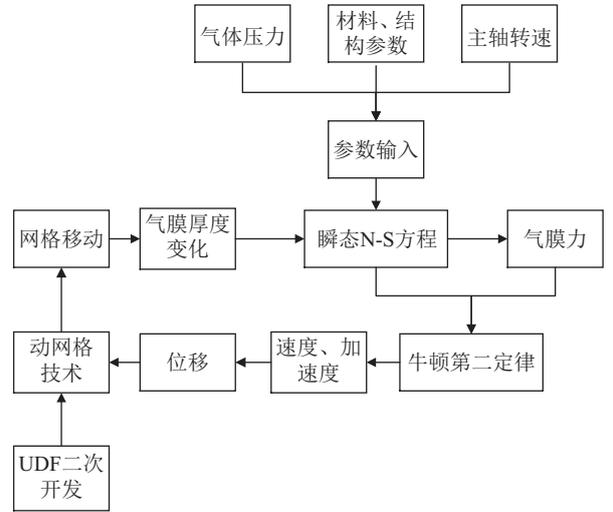


图1 回转误差求解流程图

Fig.1 Flowchart of solving rotation error

## 2 回转误差影响规律分析

### 2.1 制造误差表征

通过分析测量数据图(图2是实验测得的多组测量数据中的不同主轴圆度的测量结果),得到了主轴的圆度误差幅值在0~1.2  $\mu\text{m}$ 之间,且从图2中可以得到圆度误差信号是由一个个不同的振幅与不同的频率的正余弦波形信号叠加而成,可以通过傅里叶变换对其进行分解,所以本文通过将圆度误差信号表征成图3所示的不同波形的几何模型,再在不同波形的情况下改变振幅,以表征圆度误差,从而可以比较准确地表征出主轴圆度误差对多孔质气体静压主轴的回转误差的影响规律。文中误差幅值表示图3中波峰的高度到理想圆的距离,误差频率表示波数的多少(模型中用 $N$ 表示)。通过误差幅值与误差频率概念,可以合理对其进行表征,并仿真计算其对多孔质气体静压轴承的回转精度的影响规律。

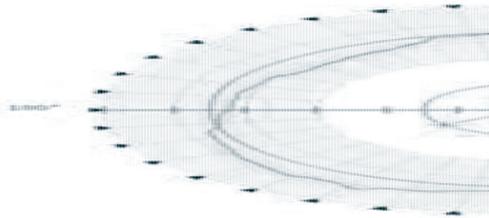


图 2 两种主轴圆度误差实验测量图

Fig.2 Measurement of two kinds of spindle roundness errors

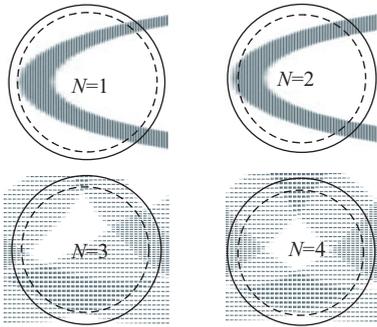


图 3 主轴圆度误差建模示意图

Fig.3 Modeling of roundness error of spindle

## 2.2 数值模拟模型建立

在对多孔质气体静压轴承的径向静态特性研究时,保留与其相关的流体域、固体域以及边界条件,将其无关的结构简化后得到几何模型和流场网格划分如图4所示。

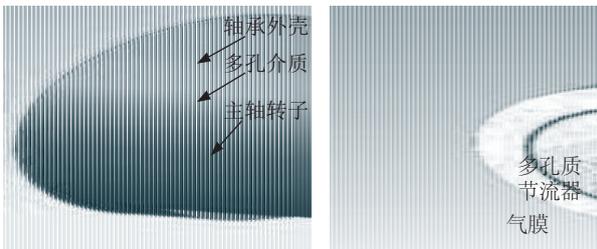


图 4 多孔质静压轴承模型及网格划分

Fig.4 porous aerostatic bearing model and meshing

数值求解边界条件设定:入口气体压强为506 625 Pa,出口压力与大气压强一致,动态运转速度为300 rad/s,多孔质的黏性阻力系数为 $1.25 \times 10^{-4}$ ,惯性阻力系数为 $2.49 \times 10^{-7}$ ,流体为理想空气。

## 2.3 圆度误差影响规律分析

### 2.3.1 相同波形,不同幅值的分析

根据实验测得了主轴的圆度误差值,分析数据结果合理选择了圆度误差幅值为0、0.5、1.0  $\mu\text{m}$ 的主轴进行仿真计算,计算得到了单波、双波、三波以及四波4种不同波形的不同幅值的仿真结果。单波的仿真结果如图5所示。通过图5可以看出,随着误差幅值的增加单波X、Y向主轴所受承载力逐渐增大,而且位

移幅值远远大于理想情况(即误差幅值为0  $\mu\text{m}$ )时的位移。Y方向的位移初始时,震荡变化明显,这也与误差方向为Y方向的情况比较相符。从图7可以看出单波不同幅值的轨迹都显得比较混乱,侧面反映了单波对主轴回转精度的影响比较明显。

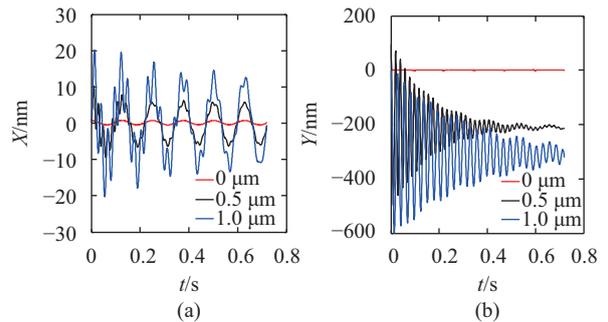


图 5 单波不同幅值的主轴X和Y方向坐标变化值

Fig.5 Spindle X and Y direction coordinate changes under different amplitude for single-wave

双波的仿真结果如图6所示,从图6可以看出,随着误差幅值的增加,主轴位移逐渐增大,当误差幅值为1.0  $\mu\text{m}$ 时,主轴的位移的波峰与波谷初始差值达到了38 nm,稳定之后,仍然有21 nm。从图7可以看出,双波主轴运动轨迹逐渐趋于椭圆状。

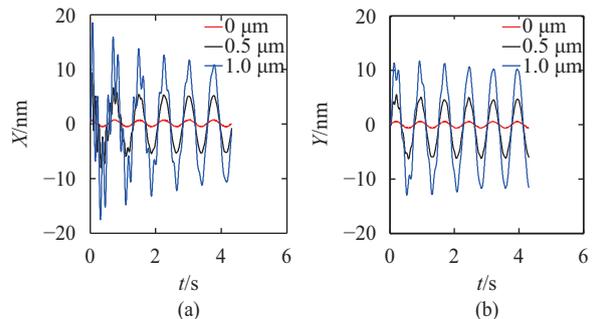


图 6 双波不同幅值的主轴X、Y向坐标变化值

Fig.6 Spindle X and Y direction coordinate changes under different amplitude for double-wave

三波的仿真结果如图8所示,从图8可以看出,主轴位移更趋近于正余弦波形,波峰、波谷外的局部震相较单波与双波的情形逐渐降低。从图7可以看出,三波主轴的运动轨迹更加扁,而且随着幅值的增加,轨迹震荡越大。

四波仿真结果如图9所示,从图9可以看出,随着幅值的增加,位移呈现的规律与其他波形大致相同,区别在于位移幅值的大小不一样,这也间接说明了不同的波形对于主轴回转精度的影响是不一样的。四波主轴运动轨迹相较于三波主轴运动轨迹更加趋近于圆。

通过比较每种波形的不同幅值的图像,可以得出以下结论:随着幅值的增加,主轴在转动过程中,

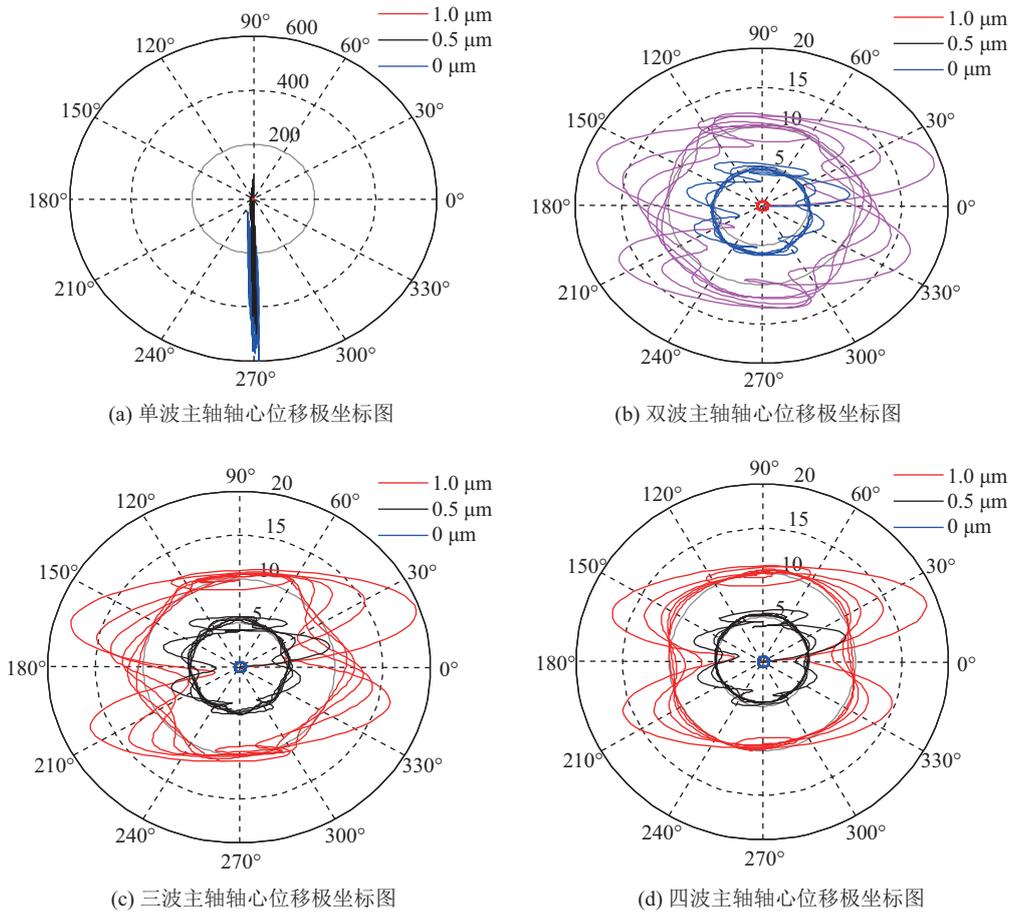


图 7 4种波形不同幅值主轴极坐标图

Fig.7 Polar map for four kinds of different amplitude of spindle

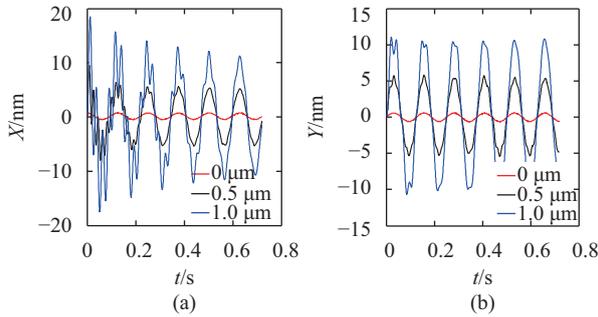


图 8 三波不同幅值的主轴X、Y向坐标变化值

Fig.8 Spindle X and Y direction coordinate changes under different amplitude for Three waves

X、Y向坐标会不断增大, 主轴中心偏离原点半径会越来越; 单波误差对主轴回转精度的影响远远大于其他波形, 特别是对单波波形所在方向即Y方向的影响远远大于其他波形。而从不同波形的极坐标图比较可以看出, 基数波的轨迹比偶数波更趋近于椭圆。而当误差幅值为 $1.0\ \mu\text{m}$ 时计算出的主轴回转误差的值更是达到了 $23\ \text{nm}$ 。

2.3.2 相同幅值, 不同波形的分析

为了准确比较各个波形对主轴回转精度的影

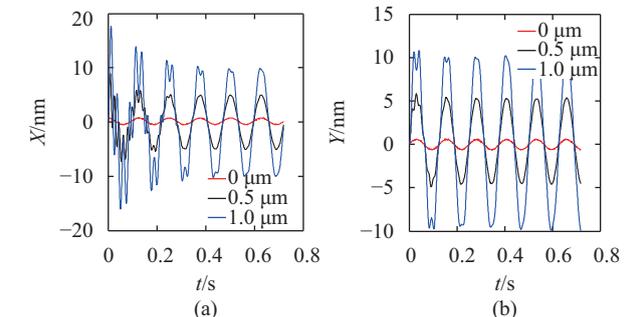


图 9 四波不同幅值的主轴X、Y向坐标变化值

Fig.9 Spindle X and Y direction coordinate changes under different amplitude for four waves

响, 将4种波形在误差幅值为 $1.0\ \mu\text{m}$ 的情况分别进行了比较, 结果如图10所示。从图10主轴的X、Y向受力比较可以看出, 不同波形对主轴的X、Y向受力与坐标影响比较明显, 远远大于没有制造误差时的情况。图11反映出单波的影响最为明显, 特别是单波所在方向引起的震荡远远大于其他波形; 而通过比较奇单波、三波与双波、四波对主轴受力以及回转轨迹的影响可以得到, 奇数波对主轴回转精度的影响大于偶数波; 而且, 随着波数的增加, 回转误差逐渐降低。所

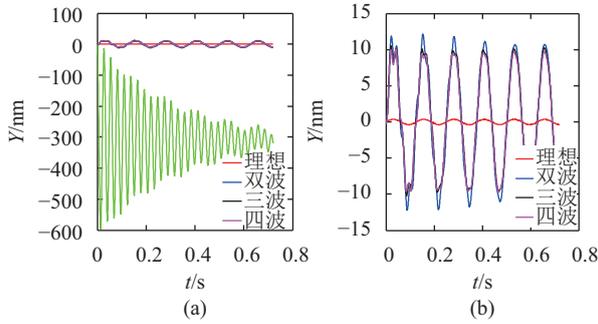


图 10 不同波形下幅值 $1.0\ \mu\text{m}$ 时Y向整体和局部位移变化  
Fig.10 Y integrated and local displacement change for  $1.0\ \mu\text{m}$  amplitude of different waveforms

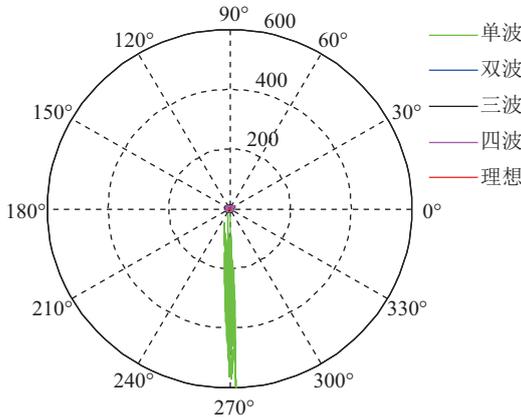


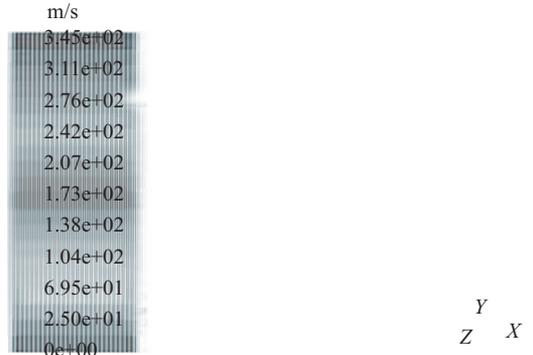
图 11 不同波形下幅值 $1.0\ \mu\text{m}$ 时轴心轨迹变化  
Fig.11 Change of the axis for  $1.0\ \mu\text{m}$  amplitude under different waveforms

以,由上述结论可知,在制造空气静压主轴时,应尽量避免单波情形出现,并且尽量选择误差波形比较均匀的空气静压主轴作为工作主轴,这样能提高主轴的回转精度。

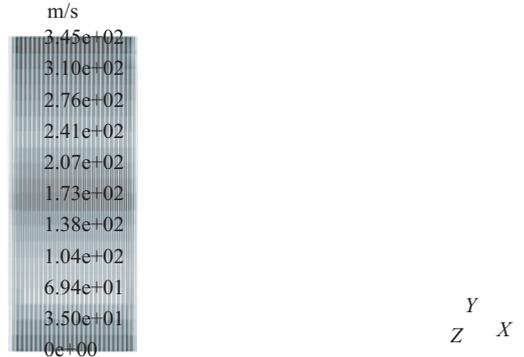
从图10主轴的X、Y向受力比较可以看出,不同波形对主轴的X、Y向受力与坐标影响比较明显,远远大于没有制造误差时的情况。图11反映出单波的影响最为明显,特别是单波所在方向引起的震荡远远大于其他波形;而通过比较奇单波、三波与双波、四波对主轴受力以及回转轨迹的影响可以得到,奇数波对主轴回转精度的影响大于偶数波;而且,随着波数的增加,回转误差逐渐降低。所以,由上述结论可知,在制造空气静压主轴时,应尽量避免单波情形出现,并且尽量选择误差波形比较均匀的空气静压主轴作为工作主轴,这样能提高主轴的回转精度。

2.3.3 圆度误差的影响机理分析

为准确分析制造误差对多孔质气体静压轴承的回转精度的影响机理,故选取了理想主轴与幅值为 $1.0\ \mu\text{m}$ 的三波主轴的速度云图,见图12。通过比较可以看出,三波制造误差对气膜间隙内的流场产生了影响,影响了原本均匀的流场,从而使主轴受力发生



(a) 理想主轴动态过程

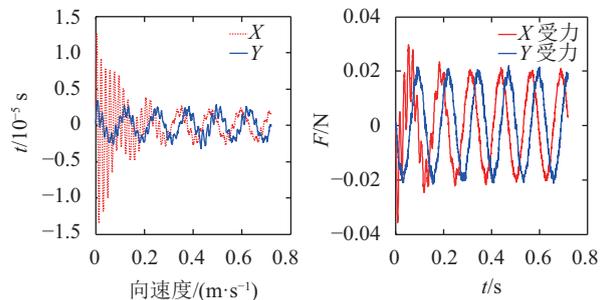


(b) 三波主轴动态过程

图 12 理想和三波主轴某一时间点速度矢量云图

Fig.12 Velocity vector cloud of ideal and three wave spindles in certain time

变化,如图13所示。进而在动态计算过程中,影响气膜间隙内部的速度矢量及速度大小,从而影响主轴的位移变化。从图13可知流场内部的受力及位移变化规律。



(a) 主轴X/Y向速度变化图

(b) 主轴受力变化图

图 13 动态过程中主轴速度变化及受力变化图

Fig.13 Change of spindle speed and force during dynamic process

总结以上分析可以得到:首先是由于误差幅值的存在,影响了气膜间隙内部流场分布,进而影响气膜力;当主轴运动时,由于气膜内部流场的不均匀,导致运转过程中,受力不平衡,发生变化,从而影响主轴的加速度,速度变化,导致主轴位移发生偏移,进而偏离理想平衡位置,产生回转误差。

流场的分布是多孔质气体静压轴系运转的关

键,任何能够影响多孔质内部流场和气膜间隙内部流场的因素,都会对主轴的回转精度产生一定的影响,产生影响的大小则由内部流场变化大小决定。这在一定程度上说明了误差均化机理产生的缘由,正是由于流场能够随着误差频率的增加而变得更加均匀,才使得波数越多,回转误差幅值逐渐减小。

由图14可知,无论是奇数波还是偶数波,只要是存在波峰的地方,压强云图中会出现压强集中部分;通过比较发现,偶数波比奇数波的压强云图更加均匀,压强集中的部分会逐渐增多,而当波数接近均匀,且压强分布随着波数的增加出现极限之处,这些不均匀的部分就会结合成一个整体,这时所有压强分布均匀一致,出现的压强云图将与理想情况一致,从而使多孔质气体静压轴承回转误差近似为0,这也与孙金方等<sup>[17]</sup>提出的误差均化机理的结论一致。

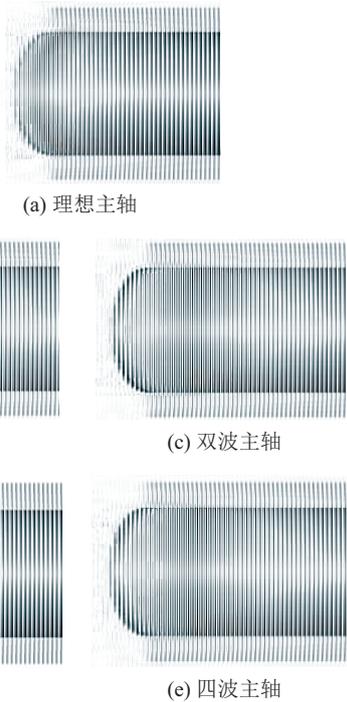


图14 5种波形主轴ZY面压强云图

Fig.14 Spindle ZY surface pressure cloud under five kinds of waveform

## 2.4 回转精度的实验验证

为了验证仿真结果的正确性,搭建了如图15所示的实验平台对径向主轴的圆度误差以及回转精度进行测试。首先将空气主轴安装在底盘支架上,电机与主轴底部通过相关装置连接。标准球竖直粘在主轴上方,位移传感器与圆度标准球接触,在回转误差测量过程中采用反向法测量。

由于轴承制造误差的随机性,现有实验条件不能对所有类型的制造误差进行一一测定,固对现有轴承的单波制造误差的主轴进行验证。

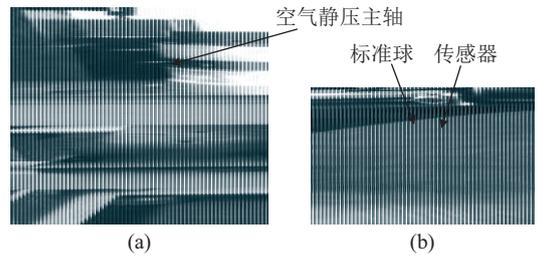


图15 制造误差测试平台

Fig.15 Manufacturing error test platform

空气主轴圆度误差测试结果如图16所示,测得的圆度误差的最大幅值为 $1.0\ \mu\text{m}$ ,主轴回转误差的最大值为 $50\ \text{nm}$ ;仿真计算得出的最大误差值 $23\ \text{nm}$ ,圆度误差仿真计算值占实验测得回转误差(包含垂直度、圆柱度、圆度等引起的回转误差)的46%,故得出圆度误差是影响主轴回转精度的主要因素。

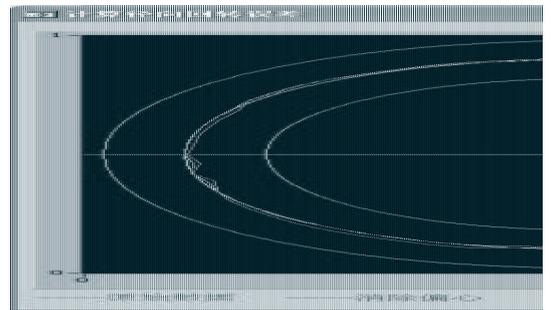


图16 圆度误差测试结果

Fig.16 Test results of roundness error

## 3 结论

通过实验结果与仿真结果比较,验证了本文采用的仿真方法与仿真模型的正确性和有效性。可以得到以下结论:

1)基于动网格技术提出的一种空气主轴回转精度的预测方法,能够有效解决回转精度的计算问题,并且经过工程试验验证了该方法的准确性和有效性,能够为日后的工程应用提供参考,具有一定的实际应用价值。

2)圆度误差是影响主轴回转精度的主要因素。圆度误差对主轴的回转精度的影响主要是因为圆度幅值对内部流场的分布造成了重大影响,从而导致主轴受力不均,进而影响回转精度,产生回转误差。

3)奇偶波对主轴运动轨迹的影响是有一定区别的。相同幅值下,奇数波的影响要略大于偶数波,单波除外,单波的影响要远大于其他波形,特别是在主轴开始转动时,误差影响很大。无论奇数波还是偶数波都随着误差频率(即波数)的增加,回转误差幅值逐渐降低。

4)误差幅值的增加会显著影响回转精度,导致

回转误差值增加,因此空气主轴的加工精度是保证多孔质气体静压主轴回转精度的重要因素。

#### 参考文献:

- [1] Li Shengyi, Dai Yifan. New development of the ultra precision machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 7-14. [李圣怡, 戴一帆. 超精密加工机床新进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 7-14.]
- [2] Yuan Julong, Zhang Feihu, Dai Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177. [袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.]
- [3] 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.
- [4] An C H, Zhang Y, Xu Q, et al. Modeling of dynamic characteristic of the aerostatic bearing spindle in an ultra-precision fly cutting machine[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(4): 374-385.
- [5] Huang P, Lee W B, Chan C Y. Investigation of the effects of spindle unbalance induced error motion on machining accuracy in ultra-precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 94: 48-56.
- [6] Eleshaky M E. CFD investigation of pressure depressions in aerostatic circular thrust bearings[J]. Tribology International, 2009, 42(7): 1108-1117.
- [7] Sun Ang, Ma Wenqi, Wang Zuwen. Research on interaction of shock waves with boundary layer in static gas bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 1-5. [孙昂, 马文琦, 王祖温. 静压气体轴承中的激波与边界层相互影响的研究进展[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 1-5.]
- [8] Wang Zuwen, Sun Ang. Research and development for supersonic phenomenon of externally pressure gas lubrication bearings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(1): 6-10. [王祖温, 孙昂. 静压气体轴承超声速现象的研究与发展[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 6-10.]
- [9] Gao S, Cheng K, Chen S, et al. CFD based investigation on influence of orifice chamber shapes for the design of aerostatic thrust bearings at ultra-high speed spindles[J]. Tribology International, 2015, 92: 211-221.
- [10] Chen X, Chen H, Luo X, et al. Air vortices and nano-vibration of aerostatic bearings[J]. Tribology Letters, 2011, 42(2): 179-183.
- [11] Panzera T H, Rubio J C, Bowen C R, et al. Microstructural design of materials for aerostatic bearings[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(7): 649-660.
- [12] Schenk C, Buschmann S, Risse S, et al. Comparison between flat aerostatic gas-bearing pads with orifice and porous feedings at high-vacuum conditions[J]. Precision Engineering, 2008, 32(4): 319-328.
- [13] Otsu Y, Miyatake M, Yoshimoto S. Dynamic characteristics of aerostatic porous journal bearings with a surface-restricted layer[J]. Journal of Tribology, 2011, 133(1): 186-192.
- [14] Kosmynin A V, Kabaldin Y G, Vinogradov V S, et al. Partly porous gas static bearings of high speed spindle units of metal working machines[J]. European Journal of Natural History, 2007(2): 105-109.
- [15] Kim K M, Kim K W. An analytical study on the rotational accuracy of externally pressurized air journal bearing[J]. JSME International Journal, 1992, 35(3): 485-492.
- [16] Kashchenevsky L, Johson D. Theoretical analysis of rotational accuracy for thrust hydrostatic bearings[J]. ASPE Summer Topical Meeting, 2007, 41: 7-9.
- [17] Sun Fangjin. Analysis of radial rotation accuracy of air static pressure bearing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1991, 12(3): 324-328. [孙方金. 空气静压轴承径向回转精度的分析[J]. 仪器仪表学报, 1991, 12(3): 324-328.]
- [18] Zheng Yingjun, Li Dongsheng. Study on averaging mechanism of radial rotating errors of aerostatic bearings[J]. Tool Engineering, 2002, 36(2): 38-40. [郑颖君, 李东升. 气体静压轴承系径向回转误差均化机理的研究[J]. 工具技术, 2002, 36(2): 38-40.]
- [19] Akira K, Masakazu M. Effects of part accuracy on rotational accuracy in hydrostatic bearing[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1979, 45(10): 1174-1176.
- [20] Jing Gang, Zhang Liping, Zhang Siju, et al. Test and research on accuracy of high precision spindle rotation[J]. Manufacture Ring Technology & Machine Tool, 1996(6): 24-26. [景岗, 张立平, 张思矩, 等. 高精度主轴回转精度的测试与研究[J]. 制造技术与机床, 1996(6): 24-26.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Wang Wei, Zhang Min, Mei Xiong, et al. The influence mechanism analysis of rotary error on porous aerostatic spindle[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 191-198. [王伟, 张敏, 梅雄, 等. 多孔质空气静压主轴动态回转误差的影响机理分析[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 191-198.]