

DOI: 10.3901/JME.2025.05.040

基于超精密磨削耦合效应的空气静压主轴设计 分析方法与试验验证*

岳松洁¹ 程凯^{1,2} 白清顺¹ 丁辉³ 赵亮¹ 高思煜¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;

2. 布鲁内尔大学 欧克斯桥 UB8 3PH 英国;

3. 江苏集萃精凯高端装备技术有限公司 昆山 215300)

摘要: 超精密内圆磨床工件轴采用空气静压支承,其在超精密内圆磨削过程中与砂轮轴间的耦合效应往往会改变空气静压主轴的回转精度并引入新的误差,对加工过程和工件精度有重要影响。提出了一种新的建模方法来研究空气静压主轴回转的耦合效应及对超精密磨削过程的影响。将工件轴-砂轮轴组成的磨削系统作为一个整体加工闭环系统来进行设计分析。为了科学地解析这一过程,以开发的超精密内圆磨床为研究对象,建立空气静压主轴双转子耦合模型,评估了空气静压轴承参数和超精密内圆磨削过程对主轴动态响应的影响。并进一步分析耦合效应在亚微米-纳米尺度下对加工表面形貌的影响。研究发现,空气静压轴承参数和动态磨削力对主轴振动有很大的影响,会降低表面加工质量,而最终的加工表面形貌由磨削系统和磨削过程的耦合共同影响决定。研究最后展示了加工试验验证,用频谱分析方法得到了加工表面的圆度误差,试验与分析结果一致,进一步验证了该方法的精密工程可靠性和应用性,该研究对于设计分析高精度空气静压主轴与科学的理解超精密内圆磨削系统中空气静压主轴耦合效应具有重要意义。

关键词: 空气静压主轴; 耦合效应; 超精密内圆磨削; 成圆精度; 跨尺度分析与设计

中图分类号: TG502

Analytical Method and Experimental Verification of Aerostatic Spindle Design Based on the Coupling Effect of Ultra-precision Grinding

YUE Songjie¹ CHENG Kai^{1,2} BAI Qingshun¹ DING Hui³ ZHAO Liang¹ GAO Siyu¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. Brunel University London, Uxbridge UB8 3PH, UK;

3. Jiangsu Jitri Jingkai High-end Equipment Technology Co., Ltd., Kunshan 215300)

Abstract: The utilization of aerostatic spindles in various applications is accompanied by the presence of coupling effects at the spindles and the machining system during the machining process. These coupling effects inherently result in a decrease in the spindle rotational motion accuracy, subsequently introducing additional errors significantly influencing both the machining process and the precision of the workpiece. The phenomenon of coupling in ultra-precision internal grinding might result in alterations to the rotary precision of the aerostatic spindle. This research presents a novel modeling approach for investigating the coupling effects of the aerostatic spindle rotary and its impact on the grinding process. The comprehensive analysis of the grinding system, which includes the workpiece spindle and the grinding wheel spindle, is conducted. The research investigates the utilization of the developed ultra-precision internal grinding machine to provide a comprehensive explanation of the process. To assess the impact of the aerostatic bearing parameters and the grinding process on the dynamic response of the spindle, a double-rotor coupling model is established. Furthermore, an analysis is conducted to examine the impact of the coupling effect on the surface topography at the submicron scale.

* 国家重点研发计划(2022YFB3402705)和黑龙江省重点研发计划(2022ZX03A05)资助项目。20240401收到初稿,20241003收到修改稿

The influence of bearing settings and dynamic grinding force on spindle vibration, which can lead to a degradation in machining quality, has been observed. Additionally, the final surface topography is defined through the coupling effects of the grinding system and the grinding process. The study concluded with the execution of machining experiments, wherein the roundness error of the machined surface was determined using spectral analysis. The obtained results from both the experimental and analytical approaches exhibited consistency, thereby confirming the reliability of the employed method. This research holds substantial importance in the realm of high-precision aerostatic spindles design and provides valuable insights into the coupling effects between the workpiece spindles and wheel spindles within the grinding system.

Key words: aerostatic spindle; the coupling effect; ultra-precision internal grinding; rounding accuracy; multiscale modelling and design analysis

0 前言

随着技术创新和高科技产品的不断涌现,工业领域对超精密零件的加工精度和制造效率近年来有着愈加苛刻的要求,超精密磨削在高质量的零件表面成形中有着不可替代的地位。为了在超精密内圆磨床开发过程中更准确地预测和优化主轴性能,在设计阶段设计出高性能的主轴系统,很多学者致力于提高模型精度的研究。其中包括主轴结构^[1-3]、不平衡力的强迫振动^[4-5]、轴承的布置和性能^[6-8]、系统跨尺度设计分析^[9-10]、磨削参数^[11-12]、动态磨削过程^[13-14]对高精度主轴和机床的动态性能有着重要影响。

空气静压轴承的性能是针对高精度空气静压主轴设计时考虑的首要因素。CAPPA等^[15]分析了制造误差、轴承参数和进气系统对空气静压轴承径向误差运动的影响。CHEN等^[7]提出了一种空气静压轴承动态建模方法,建立了主轴上轴承油膜特性与主轴动态性能之间的直接对应关系。SHIMADA等^[16]研究了立铣削过程中当切削力施加到旋转转子上时对主轴旋转精度的影响,对三种不同的主轴布置方式进行侧面铣削时的旋转轴跳动量进行了比较。FANG等^[17]研究了精密静压主轴的中推力轴承结构在不同工况下转子同轴度误差对主轴精度的影响。LIANG等^[18]基于机器设计、加工动力学和金属切削力学的综合原理提出了专家流体静压主轴设计系统,更高效的设计高精度静压主轴。CHEN等^[19]研究了空气静压主轴轴向和径向轴承刚度对加工表面平面度的影响。LI等^[20]利用有限差分法和线性扰动方法对径向轴承的性能进行数值预测,并计算了切削力作用下主轴动态响应。CHEN等^[21]研究了气膜非线性动态特性对主轴位移响应的影响,建立了表面形貌预测模型,获得了气膜波动对工件表面波纹度的影响规律。

为了满足内圆磨削对成圆精度的要求,应在主轴设计阶段着重考虑磨削表面的成圆过程。主轴回转运动是保持磨削零件的紧密公差和形状精度的关键问题。在磨削中,砂轮和工件之间的相互作用会产生持续的振动。这导致磨削工件的切削深度发生变化,进而导致作用在接触区的力发生变化,并在工件的圆周上产生波纹。

许多学者对空气静压主轴的动态特性进行了详细的研究,研究表明主轴在加工方向的回转精度一定程度上决定了工件的加工精度^[22-23]。CHEN等^[24]分析了主要同步误差和异步误差产生的原因。认为三个相对低频的同步分量(即1倍频、2倍频和3倍频)主要是由主轴系统的不平衡响应引起的,两个相对高频的分量(即12倍频和24倍频)主要是由驱动电机的转矩波动引起的。此外低频异步误差主要是由气膜振动引起的。WU等^[25]分析了主轴旋转过程中由偏心引起的涡动运动,以及主轴的锥度涡动及其对端面车削的工件表面形貌的影响,建立了锥度涡动的理论模型。主轴的轴向漂移在工件端面形成了周期性的波动路径,主轴轴线的锥形涡动在工件中部产生了锥形槽。ZHANG等^[26]研究了主轴不平衡引起的强迫振动的动态特性,及由于其产生的主轴误差运动对金刚石车削表面生成的影响。CHEN等^[27]研究了超精密飞切加工中主轴误差在频域内对表面误差形成机理的影响。根据飞切加工表面的两个不同评价方向,即切削方向和进给方向,从理论和试验上分析了旋转误差的影响。SUN等^[28]提出了超精密金刚石车削中考虑电机转子偏心率和气压变化的加工表面形貌理论模型,揭示了其导致的加工表面形貌的周期性波动。

针对磨削过程中砂轮轴与工件的交互作用的研究,MA等^[29]提出了一个外圆磨削过程的时域力分析模型,分析了接触长度和最大未变形切屑厚度变化时砂轮和工件之间的动态行为。它包含了主轴跳动和振动对磨削力的影响,特别是磨削参数对磨削

力的影响。探究磨削系统动态行为对磨削过程中工件表面形貌的影响, CAO 等^[11]考虑砂轮表面形貌和砂轮与工件之间相对振动, 建立了磨削过程表面形貌分析与仿真模型, 讨论了砂轮振动以及磨削参数对表面粗糙度的影响。CHEN 等^[30]研究了砂轮真实表面形貌的建模和的磨削工件表面的生成方法。这些研究重点在与砂轮轴上的磨粒与工件表面材料的微观作用。在精密加工的应用场景中, 针对空气静压主轴的多数研究仅关注了其自身的影响因素, 未考虑磨削加工过程中砂轮轴和工件轴的通过磨削作用的耦合效应, 这会对空气静压主轴的综合加工精度产生严重影响。研究主轴动态响应回转运动时, 磨削力常被视为恒定值来进行计算, 虽然求解方便, 但难以反映工件与砂轮间磨削效应、以及接触刚度不均匀并随时间变化等问题, 导致计算结果和实际情况有较大偏差。提出了一种新的基于超精密磨削耦合效应仿真和设计主轴系统的方法。在主轴部件设计阶段对表面动态形成过程进行早期评估, 为主轴性能设计指标的确定提供了理论依据。这种设计方法弥补了孤立的主轴性能与成圆过程之间的差距, 讨论了耦合效应对成圆精度的影响过程, 使其计算结果更加接近真实情况。

1 考虑双轴耦合效应的内圆磨削系统模型

超精密内圆磨削系统的结构设计如图 1 所示, 将磨削的敏感方向安排在主轴漂移较低的水平方向上以提高加工精度。空气静压主轴组件的机械部分从左至右依次为: 力矩电机、空气静压轴承、连接件、空气薄膜卡盘。砂轮-工件相对振动是影响内圆磨削成圆精度的主要原因, 因此砂轮轴与工件轴的耦合关系是建立磨削系统动力学分析方法的关键环节。为了便于分析砂轮轴-工件轴双转子耦合系统共振转速分布以及振动响应特性, 根据磨削系统结构特征, 建立双转子耦合系统力学模型, 如图 1 所示。超精密内圆磨削系统主要由砂轮轴和工件轴组成, 其中工件轴采用超精密空气静压轴承支撑, 空气静压轴承左端与力矩电机直接相联, 主轴由高性能的力矩电机直接驱动, 通过空气薄膜卡盘对工件实现夹紧。砂轮轴采用 SKF 陶珠轴承支撑, 采用 CBN 砂轮。砂轮进给后与工件接触产生磨削力, 使得砂轮与工件相互作用, 进而使工件产生材料去除。

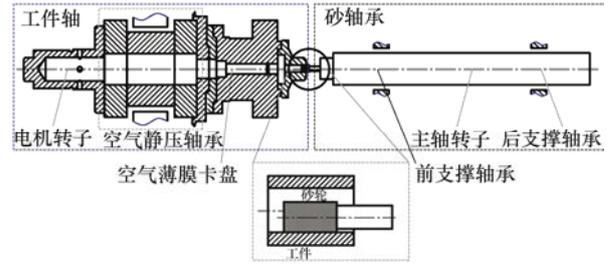


图 1 砂轮轴-工件轴耦合双转子结构系统力学模型

1.1 空气静压轴承的流体模型

描述空气静压轴承间隙的气膜压力的基于雷诺方程的控制方程表式为

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(ph^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\eta \frac{\partial(ph)}{\partial t} + 6\eta u \frac{\partial(ph)}{\partial \theta} + 6\eta w \frac{\partial(ph)}{\partial z} \quad (1)$$

式中, u 和 w 是轴的周向和轴向速度分量; p 是流场压力; h 是气膜厚度; R 是轴承的半径; η 是流体动力粘度。

以三角形单元划分轴承中的气膜, 由于气膜压力函数任意相连的单元上是连续的, 其插值函数可表示为^[7]

$$f_i = A + B\theta_i + Cz_i \quad (2)$$

式中, θ_i 和 z_i 是节点 i 处的坐标; A , B , C 是关于压力梯度和节点坐标的函数; 故空气静压轴承节点 i 处刚度模型表示为

$$k_i = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \Delta \iint_{\Omega} f(\theta, z) d\theta dz / \Delta h \quad (3)$$

1.2 砂轮轴-工件轴耦合双转子系统动力学仿真模型

在磨削系统的建模中, 轴承的承载区域和磨削区域的建模最为关键。为了准确对工艺参数对磨削过程的影响进行建模, 基于对单个磨粒的建模结果分析, 如图 2 所示。砂轮和工件接触面积上第 i 个磨粒切削力可以由式(4)计算获得^[31]。

$$\begin{aligned} Ft_{m,n}(t_0) &= K_t \left(\frac{A_{m,n}(t_0)}{A_0} + k_t \right) \\ Fn_{m,n}(t_0) &= K_n \left(\frac{A_{m,n}(t_0)}{A_0} + k_n \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $Ft_{m,n}(t)$, $Fn_{m,n}(t)$ 是作用在 (m, n) 个磨粒上的磨削力的正切分量和法向分量; $A_{m,n}(t)$ 是第 (m, n) 个磨粒与材料接触的点的横截面积; k_t , k_n 为比例因子; A_0 是磨粒末端横截面积。

将坐标系中单个磨粒的磨削力 $Ft_{m,n}(t)$, $Fn_{m,n}(t)$ 正切和法向分量转换为磨削力在 x 和 y 轴上

的投影, 关系如下

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} = \sum_{m,n} \left(\begin{bmatrix} -\cos\theta_{m,n} & -\sin\theta_{m,n} \\ \sin\theta_{m,n} & -\cos\theta_{m,n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Ft_{m,n}(t) \\ Fn_{m,n}(t) \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

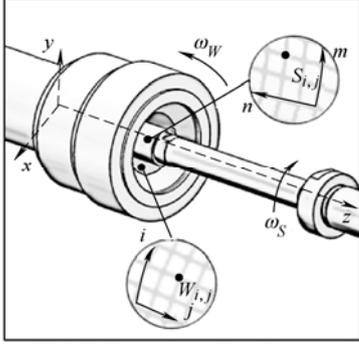


图2 内圆磨削运动关系示意图

$$a_{m,n}(t) = \begin{cases} R_{m,n}(t) \cos(\varphi_m + \omega t) - r_{i,j}(t) \cos(\varphi_i + \omega t) + \Delta r > h_{cv} \\ x_{os}(t) - x_{ow}(t) - \delta_w(t) \\ 0 & \Delta r \leq h_{cv} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a_{m,n}(t)$ 表示实际磨削厚度; $R_{m,n}(t)$ 为磨粒尖端相对砂轮坐标圆心的距离; $r_{i,j}(t)$ 为工件表面离散点相对工件坐标圆心距离随时间的变化; $x_{os}(t)$ 为砂轮轴的瞬时变形量在 x 方向上的投影; $x_{ow}(t)$ 为工件轴的瞬时变形量在 x 方向上的投影; h_{cv} 为发生材料去除的最小磨削厚度; $\delta_w(t)$ 为工件变形量。

将砂轮轴与工件轴通过工件与磨头间的接触关系联系起来, 对内圆磨削系统, 建立砂轮轴-工件轴双轴结构耦合动力学模型, 列出动力学方程

$$\mathbf{M}^W \ddot{\mathbf{q}}_W - i\omega_W \mathbf{J}^W \dot{\mathbf{q}}_W + \mathbf{K}^W(t) \mathbf{q}_W = \mathbf{Q}^W(t) + \mathbf{F}^{GW}(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{M}^S \ddot{\mathbf{q}}_S - i\omega_S \mathbf{J}^S \dot{\mathbf{q}}_S + \mathbf{K}^S(t) \mathbf{q}_S = \mathbf{Q}^S(t) + \mathbf{F}^{GS}(t) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_{m,n}(t) \\ y_{m,n}(t) \\ z_{m,n}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Os} + OS_n(t) \cos(\varphi_n(t) + \lambda) + (R_s + S_{m,n}) \sin(\omega_s t + \theta_{m,n}) \\ y_{Os} + OS_n(t) \sin(\varphi_n(t) + \lambda) + (R_s + S_{m,n}) \cos(\omega_s t + \theta_{m,n}) \\ \pm f \cdot t \end{bmatrix} \quad (11)$$

2 空气静压轴承参数对耦合效应的影响分析

在磨削周期内, 夹持工件的空气静压主轴与磨头连接的砂轮轴均会发生会导致加工误差的振动, 磨削过程中的砂轮与工件间的振动存在较大的耦合

在磨削过程中, 砂轮和工件跳动的变化都会影响磨削力, 这些动态行为将 $k_n(t)$ 最终影响表面质 $dr(t)$ 量。接触刚度是非线性的, 在 t 时刻的砂轮接触刚度被定义为法向力与变形曲线的梯度^[29,32]。工件对砂轮的相对跳动影响力的变化, 可表示为

$$k_n(t) = \frac{df_n(t)}{dr(t)} \quad (6)$$

$$f_n(t + \Delta t) = f_n(t) - \int_{r(t)}^{r(t+\Delta t)} k_n(t) \cdot k_0 \cdot dr(t) \quad (7)$$

式中, $df_n(t)$ 是磨削力的微分; $f_n(t)$ 是工件和砂轮相对位移的微分; k_0 是内圆磨削的相关系数。

内孔磨削过程中砂轮的瞬态磨削量满足式(8), 由于 CBN 砂轮刚度远高于工件刚度, 并且 CBN 砂轮耐磨性较高, 且粗精磨削方式均为单次磨削, 故此模型未计入砂轮变形和磨损。

式中, \mathbf{M} 为主轴的质量矩阵; $\mathbf{K}(t)$ 为主轴系统的刚度矩阵, 包括主轴刚度、轴承刚度以及磨削区耦合刚度; ω_w, ω_s 分别为工件轴、砂轮轴的角速度; q 为转子的广义坐标; 角标 W 代表工件轴的参数, S 代表砂轮轴的参数; $\mathbf{F}^G(t)$ 为磨削区域动载荷向量; $\mathbf{Q}(t)$ 为主轴不平衡激励向量。

求解方程, 进行双轴耦合效应的计算, 得到 (m, n) 处磨粒的运动轨迹方程, 如式(11)所示。其中 x 方向是切削深度的方向, y 方向是垂直方向, z 方向是砂轮的进给方向。其中, $x_{m,n}(t), y_{m,n}(t), z_{m,n}(t)$ 分别为 t 时刻 (m, n) 处磨粒的坐标; f 为工件进给速度; R_s 为砂轮基准半径; $S_{m,n}$ 为磨粒的高度, 按正态分布生成; $OS_n(t)$ 为位置 $z=n$ 处的涡动半径; $\varphi_n(t)$ 为 $z=n$ 处的涡动角度。

性, 而砂轮与工件在磨削区域的接触界面上的作用取决于工件轴和砂轮轴两方面的振动情况。在提升双转子耦合系统成圆精度的工艺策略中, 需要考虑空气静压轴承的结构参数, 使目标工作转速落在一个范围较大的转速区间, 且区间内没有共振转速曲线通过, 优化工作转速范围内的双转子耦合系统共振转速分布。同时, 转轴发生较大振动时会导致磨

削区域载荷条件恶劣, 承受较大动载荷时会大幅降低磨削表面质量并对砂轮和主轴寿命不利。最后, 针对双转子耦合系统的分析中, 重点在于对轴承结构布置和磨削区域耦合效应的研究。设计考虑磨削区域的节点在耦合效应下的回转运动, 使磨削状态下产生的振动最小, 需要特别注意避开高于工作转速范围的弯振振型, 此时可能造成磨削区质量快速恶化。

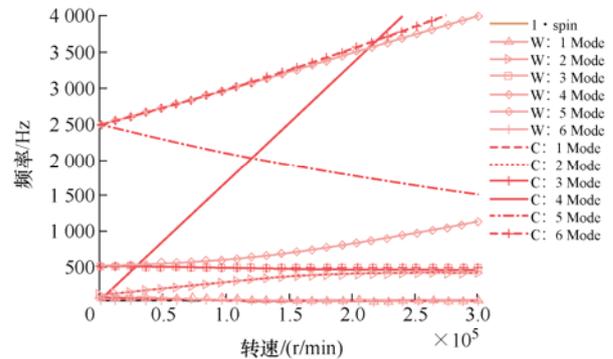
工件轴与砂轮轴在运转时通过在磨削区域处的耦合作用将振动载荷由一个转子传递给另一个轴的转子, 即砂轮轴转子不平衡会激起工件轴转子的振动, 而工件轴转子不平衡也会激起砂轮轴转子的振动。所以, 两个主轴的不平衡均会激起系统共振, 因此双转子系统的耦合运动特征更为复杂。对于工件轴来说, 由于耦合效应的引入导致临界转速略有升高, 从 5 173.91 r/min 升高到 5 284.78 r/min, 如表 1 所示。砂轮轴的设计转速在 20 万转以下, 故需不考虑更高阶数的临界转速。由转子系统弯曲变形产生的陀螺力矩均有助于提高转子系统等效刚度。在第一阶临界转速附近, 砂轮轴转子产生的陀螺力矩基本不变, 故共振转速虽略有升高但升高趋势保持不变, 该模态是以工件轴振动为主的振动模态。由于耦合效应的存在, 砂轮轴对工件轴的影响弱于工件轴对砂轮轴的影响。并且此时存在非线性接触刚度, 因此双转子耦合系统的共振转速分布特征更为复杂, 如图 3a 中 W:1~6 为单独的工件轴临界转速, C:1~6 为考虑耦合效应工件轴的临界转速。图 3b 中 C:1~9 为考虑耦合效应砂轮轴临界转速, S:1~4 为单独的砂轮轴临界转速。

表 1 耦合效应对磨削系统临界转速的影响

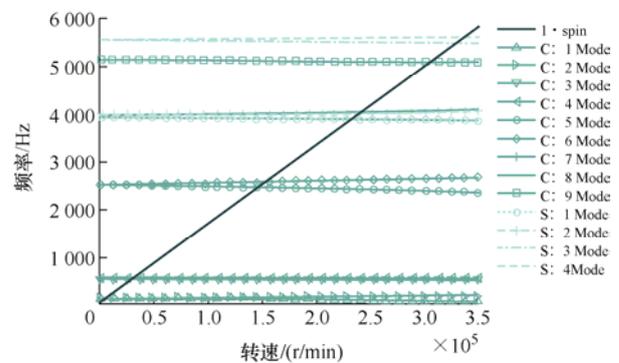
工件轴的临界转速/(r/min)	引入耦合效应的临界转速/(r/min)	砂轮轴的临界转速/(r/min)	引入耦合效应的临界转速/(r/min)
5 173.91	5 284.78	231 604.41	232 788.85
6 147.89	6 697.22	240 925.26	242 316.94
29 603.20	29 605.42		
33 189.54	31 192.15		
120 583.37	121 108.19		
213 066.81	219 587.98		

从计算结果可以看出, 在设计过程中要保证结构要求时尽可能使工件轴和砂轮轴的刚度最高, 使工作转速要求的范围内没有使工件轴转子或砂轮轴转子弯曲变形的临界转速; 设计过程选择耦合效应

最小的轴承结构以及工作转速范围, 避免产生耦合振型; 在[0, 4 000]、[7 000, 30 000]和[35 000, 110 000]较大的转速区间为空气静压主轴的设计转速。



(a) 工件轴与考虑耦合效应工件轴的临界转速



(b) 砂轮轴与考虑耦合效应砂轮轴的临界转速

图 3 磨削系统的临界转速

由于空气静压轴承特殊的结构特征, 并且工作转速高、范围大, 轴承的结构对耦合效应存在显著影响。首先分析双轴耦合系统的振动响应特性, 探究空气静压轴承结构特征对磨削区节点运动轨迹的影响。图 4 为仿真获得的 52 mm、46 mm、40 mm、36 mm 轴承支撑宽度下双转子耦合系统磨削区节点运动轨迹。从图中可以看出, 随着轴承支撑宽度的降低, 刚度随之下降低, 且磨削过程中的稳定性下降, 轴心轨迹从近似圆的轨迹变为“8”字型的运动轨迹, 空气静压主轴的振幅增大。

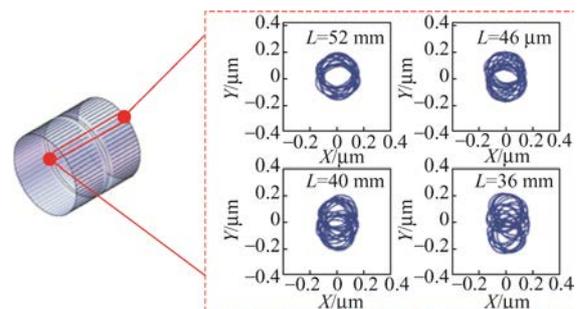


图 4 轴承宽度对磨削区节点运动轨迹的影响

节流槽的布置有利于调整压力变化趋势，设计出刚度较高的气膜结构。图5为空气静压主轴转速为12 000 r/min时，仿真获得的22 mm、20 mm、18 mm、16 mm轴承节流槽长度下，磨削区节点运动轨迹的变化情况。从图中可以看出，随着节流槽设计长度的增大，磨削区域节点的运动轨迹趋于稳定，这有利于磨削加工过程的稳定。

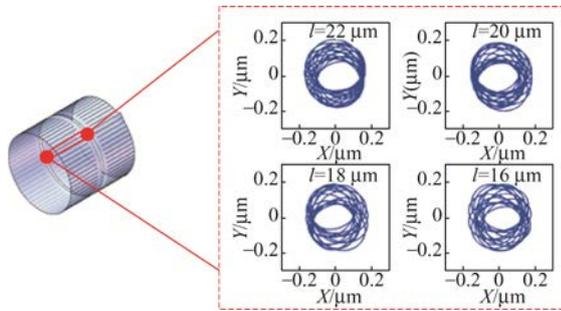


图5 节流槽长度对磨削区节点运动轨迹的影响

气膜厚度是空气静压轴承重要的设计参数之一。当转速为12 000 r/min轴承气膜厚度分别为15 mm、17 mm、20 mm、25 mm时，获得双转子耦合系统响应的变化，如图6所示。随着气膜厚度的增加，轴承刚度下降，空气静压主轴的转子轴心轨迹从近似圆变为花瓣状的轨迹。气膜厚度通过影响空气静压主轴的压力分布影响磨削区节点的运动，在一定范围内选择高刚度的气膜有利于提升主轴的加工精度。

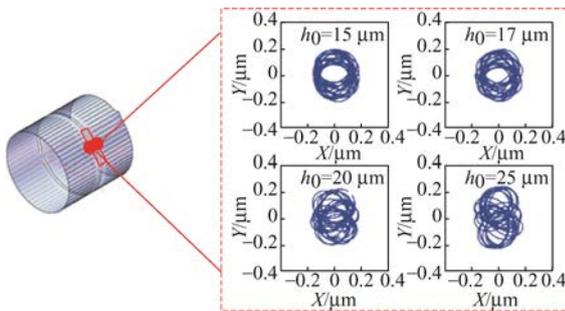


图6 气膜厚度对磨削区节点运动轨迹的影响

3 工艺参数对耦合效应的影响分析

初步确定空气静压轴承结构参数后，仿真计算出空气静压主轴在耦合作用下的回转运动。首先对双转子耦合系统运动轨迹与单独工件轴的运动轨迹进行对比分析，如表2所示。转速变化范围为7 000 r/min、8 000 r/min、9 000 r/min、10 000 r/min、11 000 r/min、12 000 r/min。在空气静压主轴转速为7 000 r/min时，运行状况为空转

时，轴心轨迹近似为一个圆；引入了耦合效应的工件轴-砂轮轴系统中，空气静压主轴的轴心轨迹近似为长轴为0.6 μm，短轴为0.4 μm的椭圆，椭圆长轴方向X轴大约成-17.5°。在超精密内圆磨削中，此时耦合效应显著影响X方向上的回转精度。在空气静压主轴转速为8 000 r/min时，转速升高，回转精度略有增加，考虑耦合效应的转子轴心轨迹变为长轴0.3 μm的椭圆。在空气静压主轴转速为9 000 r/min时，随着转速提高，回转精度进一步提高。在空气静压主轴转速为11 000 r/min时，考虑系统耦合效应的轴心轨迹在X和Y方向均有所升高。耦合效应改变了空气静压主轴回转运动的频率成分和幅值组成，进而改变空气静压主轴在磨削过程中的轴心轨迹的形态。

工件轴和砂轮轴转子通过磨削区的耦合互相传递来自两个转子不同频率的激振力。因此，耦合效应导致双转子系统磨削区域的动载荷十分复杂。其中由于工件轴、砂轮轴转子在磨削区域的振动耦合效应，磨削区域受载荷导致的振动高于转子系统其他部分，特别是主轴转子发生弯曲变形时，这种现象最为明显，严重时会导致磨削质量变差，无法达到精度要求。

磨削系统和耦合效应的协同作用显著影响着主轴回转运动，进一步影响着磨削表面成形过程。双转子耦合系统磨削区域的节点的回转运动与动载荷与工件轴、砂轮轴转子的运动状态和变形均有关系。耦合效应对X方向运动的影响比Y方向上更大，而X方向是磨削切深方向，会显著影响成圆过程。

仿真得到磨削过程中的主轴回转运动，模拟空气静压主轴轴心轨迹和工件上被切削点位、砂轮上磨粒运动轨迹，进一步分析主轴的准周期运动对内圆磨削的影响，如图7所示。从空气静压主轴在中低速磨削的过程中，成圆精度不断升高，在转速较低时时成圆精度提升最快，并根据转速比在内孔表面形成特定纹路。这与考虑耦合效应的空气静压主轴轴心轨迹变化趋势吻合。当转速较低时，耦合效应的影响最大，耦合效应越大内孔磨削的成圆表面圆度误差越大，而随着转速提高空气静压主轴回转精度提高。总体上，随着转速的升高，内孔磨削圆度误差减小，并趋向定值，此时达到空气静压主轴在磨削过程中的理想状态，如果期望进一步提升精度，则需要对砂轮轴的工艺参数进行协同优化。工件轴和砂轮轴的回转运动以及它们的转速比都会影响最终成圆精度的形成。

表 2 空气静压主轴的轴心轨迹对比

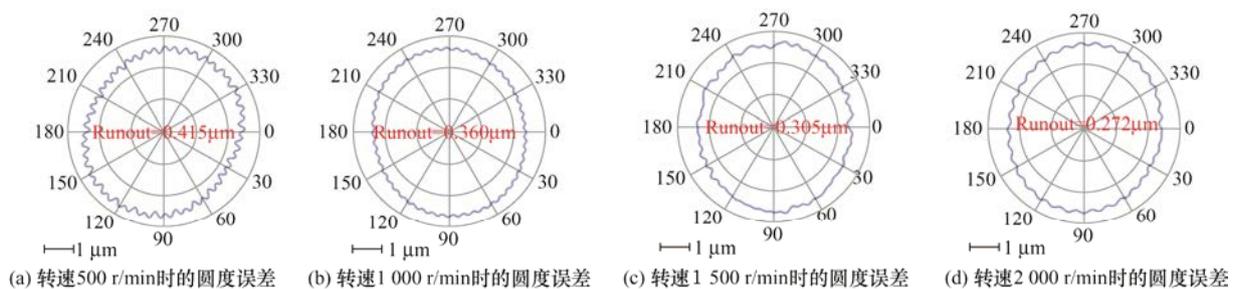
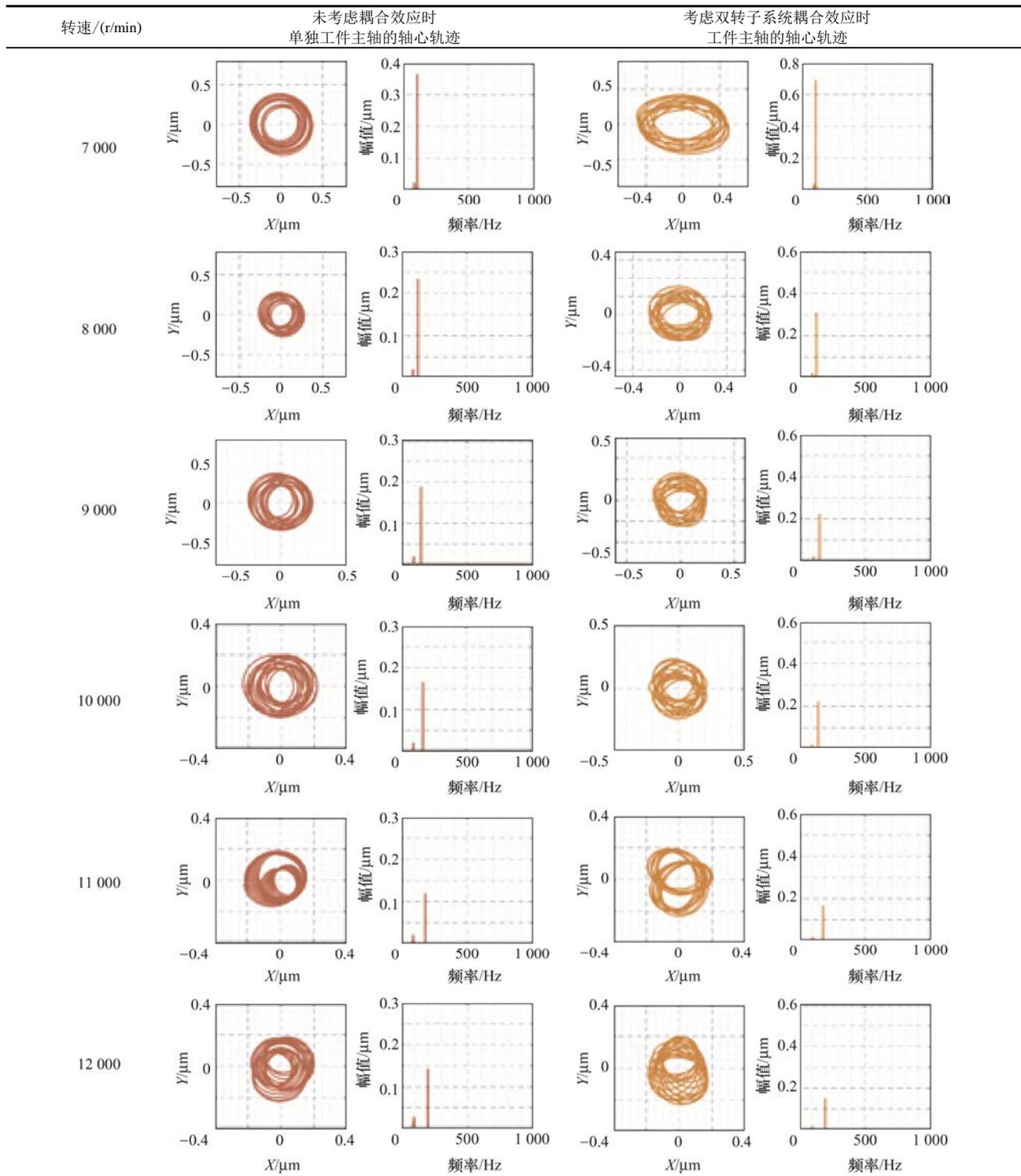


图 7 不同转速下的超精密内圆磨削成圆精度

4 超精密内圆磨削试验

图8为设计搭建的超精密内圆磨削系统。系统采用T型布置的两个直线轴，采用液体静压导轨由直线电机直接驱动，绝对式直线光栅尺进行位置反馈，分辨率小于10 nm，工件轴与修整轴安装在X轴导轨上，砂轮轴安装在Z轴导轨上最大转速150 000 r/min。磨削过程中的主轴回转运动无法通过仪器直接进行测量，故进行磨削加工试验对内圆磨削表面加工质量进行测量，间接进行试验验证。用自行研发的超精密内圆磨床进行内孔磨削。加工工艺参数为：工件轴转速1 000 r/min；砂轮轴转速110 000 r/min；磨削深度8 μm ；进给速度400 mm/min。

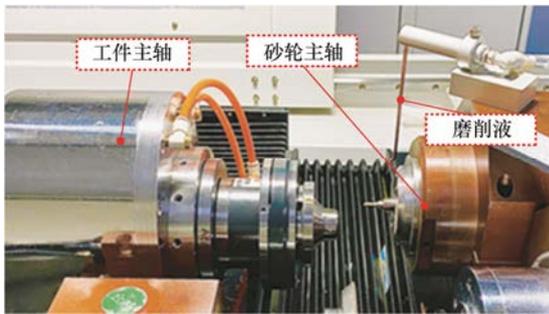


图8 超精密内圆磨削的试验装置

试验结果由Talyrond 585H圆度仪检测，传感器分辨率0.3 nm，在360°上采集零件表面点的浮动数据值，经过滤波处理和圆度误差评价方法提取和计算出工件圆度值。试验工件轮廓如图9所示，圆度误差为0.3 μm ，与仿真值吻合度高于90%。将试验结果与理论结果相比较，超精密磨削系统达到精度要求。仿真与试验之间的差异来自于在实际磨削中测试砂轮轴和工件轴的实际转速与机床中设置的转速不完全相同。由于转速比发生波动，磨粒在磨削表面留下的谐波分量与仿真不完全相同，且磨

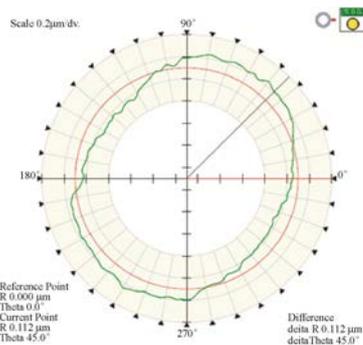


图9 超精密内圆磨削的圆度误差

粒高度随机正态分布，这与实际修整后的砂轮形貌存在一定差异。而且工件初始形貌不同会对力的波动产生影响，进而影响表面形成，且存在相位差异，导致形貌不完全相同。

5 结论

研究针对空气静压主轴在超精密内圆磨削加工系统中工件轴与砂轮轴的双轴应用，提出了考虑双轴耦合效应的空气静压主轴设计分析方法，建立空气静压砂轮轴-工件轴双转子耦合结构系统动力学模型，对空气静压主轴进行相应的设计分析与仿真，主要结论如下所述。

(1) 研究了砂轮轴-工件轴双转子系统耦合效应下的空气静压主轴回转精度，分析了耦合作用对空气静压主轴动态特性的影响，并采用超精密磨削加工试验对空气静压主轴的设计参数进行了验证。

(2) 解析了超精密内圆磨削过程中的动态变化，获得了磨削区域离散点的动力响应及振动规律，计算结果显示磨削系统的耦合效应对成圆过程有显著影响；提出了双转子耦合系统成圆精度提升的工艺策略，为合理设计工艺参数提供了依据。

(3) 通过试验验证了所提出分析模型和方法的有效性。耦合效应引起了工件轴和砂轮轴接触刚度的变化，降低了主轴的回转精度，显著影响着成圆过程，进而影响了成圆精度。该设计分析方法有利于设计出更高性能的空气静压主轴与超精密内圆磨削系统。

参 考 文 献

- [1] LU Lihua, GAO Qiang, CHEN Wanqun, et al. Investigation on the fluid-structure interaction effect of an aerostatic spindle and the influence of structural dimensions on its performance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(11): 1434-1440.
- [2] SHI Jianghai, CAO Hongrui, MAROJU N K, et al. Dynamic modeling of aerostatic spindle with shaft tilt deformation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142(2): 021006.
- [3] 雷群, 袁雅阁, 杜建军, 等. 飞刀铣削中高速气浮电主轴转子动态特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13):

- 45-54.
- LEI Qun, YUAN Yage, DU Jianjun, et al. Study on rotor dynamics characteristics of high speed aerostatic motorized spindle during fly-cutter milling process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 45-54.
- [4] CHEN Yong, CHEN Xun, XU Xipeng, et al. Quantitative impacts of regenerative vibration and abrasive wheel eccentricity on surface grinding dynamic performance[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5-8): 2271-2283.
- [5] LU Xiaohong, JIA Zhenyuan, LIU Shengqian, et al. Chatter stability of micro-milling by considering the centrifugal force and gyroscopic effect of the spindle[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(11): 111003.
- [6] SONG Laiyun, CHENG Kai, DING Hui, et al. The static performance of the high-speed aerostatic spindles with modified discharge coefficients[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2020: 1-13.
- [7] CHEN Wanqun, LIANG Yingchun, SUN Yazhou, et al. A novel dynamic modeling method for aerostatic spindle based on pressure distribution[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2015, 21(16): 3339-3347.
- [8] 熊万里, 原帅, 胡灿, 等. 液体静压主轴的回转精度规律及其极限预测[J]. *机械 工 程 学 报*, 2021, 57(13): 70-82.
- XIONG Wanli, YUAN Shuai, HU Can, et al. The laws and ultimate prediction of rotation accuracy for hydrostatic spindle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(13): 70-82.
- [9] GAO Siyu, CHENG Kai. Multiphysics-based design and analysis of the high-speed aerostatic spindle with application to micro-milling[J]. *Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2016, 230(7): 852-871.
- [10] SUN X, CHENG K. Multiscale simulation of the nanometric cutting process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47: 891-901.
- [11] CAO Yanlong, GUAN Jiayan, LI Bo, et al. Modeling and simulation of grinding surface topography considering wheel vibration[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 66(5-8): 937-945.
- [12] WANG Xuezh, YU Tianbiao, DAI Yuanxing, et al. Kinematics modeling and simulating of grinding surface topography considering machining parameters and vibration characteristics[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(9-12): 2459-2470.
- [13] GUO Miaoxian, LI Beizhi, DING Zishan, et al. Empirical modeling of dynamic grinding force based on process analysis[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9-12): 3395-3405.
- [14] LEONESIO M, PARENTI P, CASSINARI A, et al. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 4: 166-171.
- [15] CAPPAS S, REYNAERTS D, Al-Bender F. Reducing the radial error motion of an aerostatic journal bearing to a nanometre level: Theoretical modelling[J]. *Tribology Letters*, 2014, 53(1): 27-41.
- [16] SHIMADA K, WAKABAYASHI D, SHIMOYAKAWA Y, et al. Numerical study on the rotational and machining accuracy of an end-milling process with spindles supported by aerostatic bearings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(20): 10541-10553.
- [17] FANG Chenggang, HUO Dehong, HUANG Xiaodiao. A comprehensive analysis of factors affecting the accuracy of the precision hydrostatic spindle with mid-thrust bearing layout[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114(3-4): 949-967.
- [18] LIANG Yingchun, CHEN Wanqun, SUN Yazhou, et al. An expert system for hydro/aero-static spindle design used in ultra precision machine tool[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014, 30(2): 107-113.
- [19] CHEN Wanqun, LU Lihua, LIANG Yingchun, et al. Flatness improving method of KDP crystal in ICF system and its implementation in machine tool design[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2015, 229(4): 327-332.
- [20] LI Jiasheng, HUANG Ming, LIU Pinkuan. Analysis and experimental verification of dynamic characteristics of air spindle considering varying stiffness and damping of radial bearings[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5-8): 2939-2950.
- [21] CHEN Dongju, LI Shupe, ZHANG Xuan, et al. Relationship between dynamic characteristics of air film

- of aerostatic spindle and mid-frequency of surface topography[J]. *Advances in Manufacturing*, 2022, 10(3): 428-442.
- [22] LIANG Yingchun, CHEN Wanqun, AN Chenhui, et al. Investigation of the tool-tip vibration and its influence upon surface generation in flycutting[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(12): 2162-2167.
- [23] 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 and Manufacture*, 2010, 50(4): 374-385.
- [24] CHEN Guoda, SUN Yazhou, AN Chenhui, et al. Measurement and analysis for frequency domain error of ultra-precision spindle in a flycutting machine tool[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2018, 232(9): 1501-1507.
- [25] WU Quanhui, SUN Yazhou, CHEN Wanqun, et al. Theoretical and experimental investigation of spindle axial drift and its effect on surface topography in ultra-precision diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 116: 107-113.
- [26] ZHANG Shaojian, YU Jinjie, TO S, et al. A theoretical and experimental study of spindle imbalance induced forced vibration and its effect on surface generation in diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 133: 61-71.
- [27] CHEN Guoda, SUN Yazhou, ZHANG Feihu, et al. Influence of ultra-precision flycutting spindle error on surface frequency domain error formation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(9-12): 3233-3241.
- [28] SUN Yazhou, WU Quanhui, CHEN Wanqun, et al. Influence of unbalanced electromagnetic force and air supply pressure fluctuation in air bearing spindles on machining surface topography[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2021, 22(1): 1-12.
- [29] MA Yinchun, YANG Jianguo, LI Beizhi, et al. An analytical model of grinding force based on time-varying dynamic behavior[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9-12): 2883-2891.
- [30] CHEN Changshun, TANG Jinyuan, CHEN Haifeng, et al. Research about modeling of grinding workpiece surface topography based on real topography of grinding wheel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(5-8): 2411-2421.
- [31] VORONOV S A, VEIDUN M. Mathematical modeling of the cylindrical grinding process[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017, 46(4): 394-403.
- [32] CHEN Xun, BRIAN R W. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(8): 883-896.
-
- 作者简介: 岳松洁, 女, 1998年出生, 博士研究生。主要研究方向为超精密内圆磨床的设计与制造, 空气静压主轴技术。
E-mail: yuesj@stu.hit.edu.cn
- 程凯, 男, 1961年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工, 空气静压主轴系统设计分析。
E-mail: kai.cheng@brunel.ac.uk
- 白清顺(通信作者), 男, 1974年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为超精密加工与微纳制造, 精密机械设计与制造, 超洁净制造理论与技术。
E-mail: qshbai@hit.edu.cn