

## 考虑热误差的电主轴建模与 可靠性全局灵敏度分析

黄贤振<sup>1,2</sup>, 于瑞<sup>1</sup>, 姜智元<sup>1</sup>, 荣治明<sup>3</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 大连海洋大学 应用技术学院, 辽宁 大连 116300)

**摘要:** 以数控机床电主轴为研究对象, 旨在分析其轴向热伸长量对电主轴可靠性的影响. 采用 Svenska Kullager-Fabriken (SKF) 摩擦力矩模型对轴承生热量进行分析, 设定对流换热系数为边界散热条件, 建立了热分析有限元耦合模型, 求解电主轴的温度以及轴向热伸长分布. 将有限元模型与实验结果进行对比, 验证了建立的有限元模型的准确性. 考虑随机因素的影响, 建立电主轴热变形可靠性分析模型, 并采用 Kriging 模型进行可靠性求解. 对电主轴热误差可靠性全局灵敏度进行分析, 结果表明, 转速和冷却水流量对可靠性影响较大, 轴向力和径向力对可靠性影响较小.

**关键词:** 电主轴; 热特性; 有限元分析; Kriging 模型; 可靠性; 全局灵敏度

中图分类号: TG 659 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)05-0675-08

## Modeling and Reliability Global Sensitivity Analysis of Motorized Spindles Considering Thermal Errors

HUANG Xian-zhen<sup>1,2</sup>, YU Rui<sup>1</sup>, JIANG Zhi-yuan<sup>1</sup>, RONG Zhi-ming<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems Ministry of Education of China, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Applied Technology College, Dalian Ocean University, Dalian 116300, China. Corresponding author: RONG Zhi-ming, E-mail: rongzhiming@dlou.edu.cn)

**Abstract:** Taking the motorized spindle of computer numerical control machine tools as the research object, the influence of its axial thermal elongation on the reliability of the motorized spindle is explored. The Svenska Kullager-Fabriken (SKF) friction torque model is used to analyze the heat generation of the bearing. The convective heat transfer coefficient is set as the boundary heat dissipation condition. The finite element coupling model of thermal analysis is established to solve the temperature and axial thermal elongation distribution of the spindle. The finite element model is compared with the experimental results to verify the accuracy of the established finite element model. Considering the influence of random factors, the reliability analysis model of spindle thermal deformation is established, and the reliability is solved by the Kriging model. Finally, the global sensitivity analysis of the thermal error reliability of the motorized spindle is carried out. The results show that the rotational speed and cooling water flow have a great influence on the reliability, and the axial force and radial force have little influence on the reliability.

**Key words:** motorized spindle; thermal characteristics; finite element analysis; Kriging model; reliability; global sensitivity

数控机床是工业生产中的基本生产设备, 随着科技进步与工业生产率的不断提高, 机床朝

收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2087, U23B2098); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300160); 辽宁省教育厅高校基本科研资助项目(LJKQZ2021124)

作者简介: 黄贤振(1982-), 男, 山东定陶人, 东北大学教授, 博士生导师.

着高速度、高精度、高可靠性的方向发展.在电主轴高速运转过程中会产生大量的热量,导致电主轴轴向热伸长,从而影响加工精度和稳定性<sup>[1]</sup>.研究表明机床热误差导致的制造误差占精密加工总制造误差的40%~70%<sup>[2-3]</sup>.因此准确预测电主轴在工作过程中的温度及热变形分布可以为热误差补偿及优化奠定基础,进而提高加工精度.

近年来国内外众多学者对主轴热特性进行了大量研究.Zhang等<sup>[4]</sup>采用分形理论和混合遗传算法对加工中心主轴温度分布场进行研究.Fang等<sup>[5]</sup>考虑界面接触热阻(thermal contact resistance, TCR)这一因素,通过有限元分析研究了高速主轴温度场分布.Ma等<sup>[6]</sup>考虑TCR和轴承组件热位移引起的热功率和刚度变化,建立的有限元分析模型较为准确地预测了电主轴温度分布及热变形.Yao等<sup>[7]</sup>提出了一种新的电主轴热误差预测的最优有效复合模型,在热误差预测方面更为准确.Liu等<sup>[8]</sup>研究数控车床电主轴热变形,基于物理建模的方法,建立了热误差与关键点温度的关系.Zhang等<sup>[9]</sup>提出了一种基于生物地理学优化算法的传热系数优化模型,可以根据电主轴表面温度准确地预测电主轴热变形.Lee等<sup>[10]</sup>用有限元方法与热分析相结合,得到了电主轴系统在不同转速下的温度分布.

上述研究是将电主轴材料参数视为确定的.在实际的工作环境中,轴承内外圈温度分布可能呈现不均匀的状态,转速、润滑油黏度和冷却系统输入水量等参数属于本质上的随机变量.这些随机因素导致机床主轴在运转过程中,存在着温度和主轴热变形方面的变化,进而导致理论分析与实际情况发生偏离.

本文以机床电主轴为研究对象,通过对热源以及边界散热条件进行分析,建立有限元模型预测电主轴温度分布以及轴向热变形,以电主轴轴端最大热变形为评价指标,建立电主轴可靠性模型.采用Kriging模型计算电主轴系统的可靠度和全局灵敏度,为降低电主轴热变形、提高机床加工可靠度提供理论基础和数据支持.

## 1 电主轴热源及散热分析

数控机床电主轴如图1所示,主要由转轴、定子、转子、轴承组和外壳等零部件组成.对于高速旋转的电主轴,其生热部位主要包含前、后轴承组和电机定子、转子两大部分.

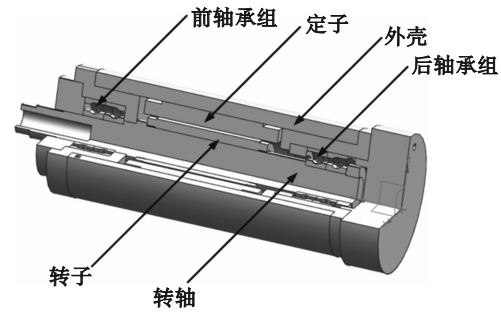


图1 电主轴模型

Fig. 1 Model of the motorized spindle

电主轴的散热分析较为复杂.定子产生的大部分热量会被水道以强制对流的形式传递,此外还有一小部分热量传递给外壳.转子在转动过程中会带动与定子之间的空气,造成强制对流散热.轴承浸润在润滑油中,润滑油也会与轴承之间进行油气换热.转轴在转动过程中,带动周围空气,形成与空气的强制对流.此外外壳与空气也会产生自然对流.根据上述分析,本文主要考虑如图2所示几个部位的对流换热.

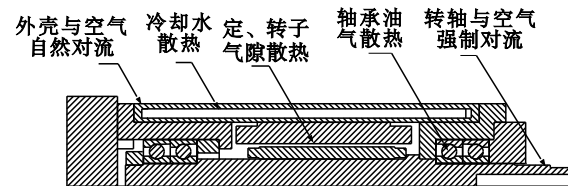


图2 电主轴对流换热位置

Fig. 2 Convective heat transfer position of the motorized spindle

为了建立有限元分析模型,需要对电主轴生热及散热条件进行分析.

### 1.1 轴承生热分析

Harris等<sup>[11]</sup>结合大量的实验总结出,轴承发热量 $Q$ 与轴承转速以及轴承运转过程中所承受的总摩擦力矩关系式为

$$Q = 1.074 \times 10^{-4} n_s M. \quad (1)$$

式中: $n_s$ 为轴承转速; $M$ 为轴承转动过程中的总摩擦力矩,表达式<sup>[12]</sup>为

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4. \quad (2)$$

式中: $M_1$ 为滚动摩擦力矩; $M_2$ 为滑动摩擦力矩; $M_3$ 为密封摩擦力矩; $M_4$ 为阻力损失的摩擦力矩,电主轴采用的润滑方式为油气润滑,不考虑此项.

滚动摩擦力矩 $M_1$ 表达式为

$$M_1 = \varphi_1 \varphi_2 G_1 (v_0 n_s)^{0.6}. \quad (3)$$

式中: $v_0$ 为润滑油运动黏度; $\varphi_1$ 为进口切向热量降低因子; $\varphi_2$ 为饥饿折减系数; $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 表达式为

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{e^{\left[ K_1 \mu_0 n_s (d+D) \sqrt{\frac{K_2}{2(D-d)}} \right]}}, \\ \varphi_2 &= \frac{1}{1 + 1.84 \times 10^{-9} (n_s d_m)^{1.28} \mu_0^{0.64}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $K_1$  为饥饿系数;  $D$  为轴承外径;  $d$  为轴承内径,  $K_2$  为滚动摩擦力矩中与轴承类型相关的常数;  $d_m$  为轴承中径.

$G_1$  表达式为

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= R_1 d_m^{1.97} (F_r + F_g + R_2 F_a)^{0.54}, \\ F_g &= R_3 d_m^4 n_s^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $F_r$  为轴承的径向载荷;  $F_g$  为中间变量;  $F_a$  为轴承的轴向载荷;  $R_1, R_2, R_3$  分别是为了计算引入的系数.

滑动摩擦力矩  $M_2$  表达式为

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= G_2 [\varphi_2 \mu_2 + (1 - \varphi_2) \mu_3], \\ \varphi_2 &= \frac{1}{e^{2.6 \times 10^{-8} (v_s n_s)^{1.4} d_m}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $\varphi_2$  为滑动摩擦系数的加权系数;  $\mu_2$  取决于润滑剂类型的系数;  $\mu_3$  为全膜条件下的滑动摩擦系数;  $G_2$  为滑动摩擦系数, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} G_2 &= S_1 d_m^{0.26} [(F_r + F_c)^{4/3} + S_2 F_a^{4/3}], \\ F_c &= S_3 d_m^4 n_s^2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中:  $S_1, S_2, S_3$  分别是为了计算引入的系数.

密封摩擦力矩  $M_3$  表达式为

$$M_3 = K_3 d_s^{\beta_s} + K_4. \quad (8)$$

式中:  $K_3$  为密封摩擦力矩中与轴承类型相关的常数;  $d_s$  为接触面直径;  $\beta_s$  为与轴承和密封件类型相关的常数;  $K_4$  为与轴承和密封件类型相关的常数.

本文使用的摩擦力矩表达式中的系数和参量从文献[13]中查取.

### 1.2 电机生热分析

在计算电机的实际效率时要代入与速度和转矩相关的两个系数<sup>[14]</sup>. 电机的实际效率为

$$\eta = \eta_{\max} \eta_s \eta_t. \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为电机效率;  $\eta_{\max}$  为电机最大效率;  $\eta_s$  为转速效率系数;  $\eta_t$  为转矩效率系数.

转速效率系数  $\eta_s$  和转矩效率系数  $\eta_t$  由电机转矩相对值及电机角速度相对值确定, 电机转矩相对值为

$$T_r = \frac{T_m}{T_{\max}}. \quad (10)$$

式中:  $T_r$  为电机转矩的相对值;  $T_m$  为电机转矩;  $T_{\max}$  为电机最大转矩.

电机角速度相对值为

$$\omega_r = \frac{\omega}{\omega_{\max}}. \quad (11)$$

式中:  $\omega_r$  为角速度相对值;  $\omega$  为电机角速度;  $\omega_{\max}$  为

最大电机角速度.

通过查表确定  $\eta_s, \eta_t$  的数值. 研究表明定子生热量占总生热量的 2/3, 转子生热量占总生热量的 1/3. 进而可以计算出定子、转子的生热量.

### 1.3 边界散热条件分析

1) 轴承油气换热. 轴承油气换热系数  $\alpha_1$ <sup>[15]</sup> 为

$$\alpha_1 = 9.7 + 5.33 \left\{ \left[ \frac{v_a}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)} \right]^2 + \left( \frac{\omega_a d_m}{2} \right)^2 \right\}^{0.8}. \quad (12)$$

式中:  $v_a$  表示空气体积流量;  $\omega_a$  为转轴旋转角速度;  $d_i$  和  $d_o$  分别代表轴承平均内、外圈直径.

2) 转轴与空气强制对流. 转轴与空气的换热系数  $\alpha_2$ <sup>[15]</sup> 为

$$\alpha_2 = 0.133 \left( \frac{\omega_a l_c^2}{2\mu_a} \right)^{2/3} Pr^{1/3}. \quad (13)$$

式中:  $\mu_a$  为空气平均流量;  $l_c$  为特征长度;  $Pr$  为普朗特数.

3) 外壳与空气自然对流. 外壳与空气的换热系数  $\alpha_3$ <sup>[16]</sup> 为

$$\alpha_3 = \alpha_c + \alpha_r. \quad (14)$$

式中:  $\alpha_c$  表示对流换热系数;  $\alpha_r$  表示辐射换热系数; 本文选取  $\alpha_3$  值为  $9.7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ .

4) 定子、转子之间气隙传热. 定子、转子气隙换热系数  $\alpha_4$ <sup>[17]</sup> 为

$$\alpha_4 = \frac{0.23 \left( \frac{2\delta_s}{D_s} \right)^{0.25} \left( \frac{\omega_a l_c^2}{2\mu_a} \right)^{0.5} \lambda_T}{2\delta_s}. \quad (15)$$

式中:  $D_s$  是转子直径;  $\delta_s$  是定子、转子之间的间隙长度;  $\lambda_T$  是定子、转子的导热系数.

5) 冷却水与电主轴传热. 冷却水与主轴之间的换热采用  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[18]</sup> 进行模拟.

### 1.4 有限元模型的构建

由于电主轴结构较为复杂, 存在大量的螺栓、倒角、圆角等结构, 这些结构会影响网格质量, 因此在有限元模型建立过程中简化这些结构来提高网格质量. 有限元建模及分析流程如图 3 所示.

## 2 电主轴热误差可靠性全局灵敏度分析

以电主轴轴端最大热变形量是否超出电主轴允许变形量作为判别条件, 建立极限状态函数  $Z$  为

$$Z = S(\mathbf{X}) - x^*. \quad (16)$$

式中:  $S(\mathbf{X})$  为数值模拟方法输出的热变形位移;  $x^*$  为机床轴心许用最大轴向变形;  $\mathbf{X}$  为参数随机变量. 机床电主轴实际工作过程中, 其转速、冷却

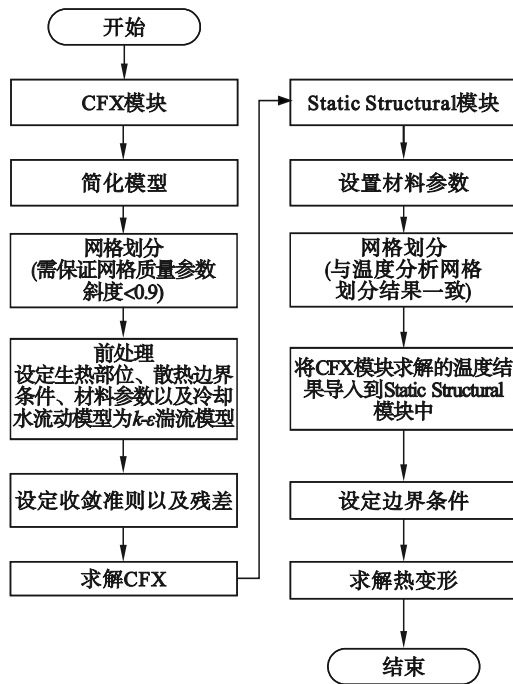


图3 有限元建模及分析流程

Fig. 3 Finite element modeling and analysis process

水流量、轴承所受轴向力和径向力本质是具有随机性的,因此随机变量 $\mathbf{X}$ 为

$$\mathbf{X}=[n_s, Q_c, \mathbf{F}_a, \mathbf{F}_r]^T. \quad (17)$$

式中: $Q_c$ 为冷却水流量。

当函数 $Z>0$ 时,表示处于电主轴轴端热变形位移超出许用值的不可靠状态,处于失效状态.对随机变量的概率密度积分可得到失效概率 $P_f$ 表达式为

$$P_f = \int_{Z>0} \dots \int f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (18)$$

式中: $f_X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为随机变量的概率密度函数;对于式(18)所示的多维积分,由于其高维性和被积项较为复杂,一般解析法和直接数值法都无法直接求解。

## 2.1 Kriging模型

在实际工程问题中, Monte-Carlo方法<sup>[19]</sup>通常用于可靠性分析,但运算量大,耗费时间较高.采用Kriging模型的方式进行可靠性分析,可以提高效率. Kriging模型<sup>[20-21]</sup>由两项组成,分别是随机分布函数和多项式之和。

$$g_k(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{X})\beta_i + z(\mathbf{X}). \quad (19)$$

式中: $g_k(\mathbf{X})$ 为未知的Kriging模型; $f_i(\mathbf{X})$ 为随机向量的基函数; $\beta_i$ 表示回归函数待定系数; $p$ 表示基函数的个数; $z(\mathbf{X})$ 表示随机过程函数. $z(\mathbf{X})$ 协方差矩阵的分量计算表达式为

$$\text{cov } z(\mathbf{X}) = \sigma^2 \mathbf{R}(\theta, x_i, x_j). \quad (20)$$

式中: $\text{cov}z(\mathbf{X})$ 为协方差矩阵; $\sigma^2$ 为方差; $\mathbf{R}(\theta, x_i, x_j)$ 为带有参数 $\theta$ 的高斯型核函数。

Kriging模型的预测值为

$$g_k(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta}^* + \mathbf{r}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{g} - \mathbf{F}\boldsymbol{\beta}^*). \quad (21)$$

式中: $g_k(\mathbf{x})$ 为Kriging模型的预测值; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 为基函数; $\boldsymbol{\beta}^*$ 是 $\beta_i$ 估计值; $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 是训练和预测样本点的相关函数; $\mathbf{g}$ 是由响应值组成的列向量; $\mathbf{F}$ 是回归模型矩阵,由 $m$ 个样本点组成。 $\boldsymbol{\beta}^*$ 和 $\sigma^2$ 由极大似然估计求得

$$\boldsymbol{\beta}^* = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}, \quad (22)$$

$$\sigma^2 = (\mathbf{g} - \mathbf{F}\boldsymbol{\beta}^*)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F}\boldsymbol{\beta}^*) / m. \quad (23)$$

根据以上分析,利用输入样本变量和输出响应值完成Kriging模型的构建。

## 2.2 可靠性全局灵敏度分析

可靠性全局灵敏度分析<sup>[22]</sup>相较于可靠性局部灵敏度分析,能够更全面衡量输入变量的变化对于结构失效概率的平均影响,采用基于绝对值差异的全局灵敏度分析指标<sup>[23]</sup>。

对于相互独立的输入变量,其联合概率密度 $f_X(\mathbf{x})$ 表示为

$$f_X(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^{n_s} f_{X_i}(x_i). \quad (24)$$

式中: $n_s$ 为随机变量个数; $X_i$ 为输入变量; $f_{X_i}(x_i)$ 为输入变量 $X_i$ 的概率密度函数.根据定义可以将式(18)改写为

$$P_f = E[I(\mathbf{x})]. \quad (25)$$

式中: $I(\mathbf{x})$ 表示失效域指示函数;当 $\mathbf{x} \in (Z > 0)$ 时, $I(\mathbf{x})=1$ ;当 $\mathbf{x} \notin (Z > 0)$ 时, $I(\mathbf{x})=0$ ; $E[\cdot]$ 表示期望均值运算。

为了分析输入变量 $X_i$ 的不确定性对热变形失效概率的影响,考虑输入变量 $X_i$ 固定时条件失效概率 $P_{f_i}$ ,即

$$P_{f_i} = \int I(\mathbf{x}|X_i) f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i}) d\mathbf{x}_{-i}. \quad (26)$$

式中: $I(\mathbf{x}|X_i)$ 为 $X_i$ 固定时的失效域函数; $\mathbf{X}_{-i} = (X_1, \dots, X_{i-1}, X_{i+1}, \dots, X_{n_s})$ 表示除了 $X_i$ 以外的其他输入变量; $f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})$ 表示 $\mathbf{X}_{-i}$ 的联合概率密度.进而输入变量 $X_i$ 对结构失效概率的影响可以通过 $P_f$ 与 $P_{f_i}$ 的差异来表示,即

$$s(X_i) = |P_f - P_{f_i}|. \quad (27)$$

式中: $s(X_i)$ 为输入变量对结构失效概率的影响。

式(27)仅仅是关于 $X_i$ 的函数,可以利用 $s(X_i)$ 的期望 $E_i[s(X_i)]$ 表示输入变量 $X_i$ 对结构失效概率的平均影响,即

$$E_i[s(X_i)] = \int s(x_i) f_{X_i}(x_i) dx_i. \quad (28)$$

为了得到一个标准化的指标,定义如下输入变量  $X_i$  对结构失效概率的全局灵敏度指标为

$$\delta_i = \frac{1}{2} E_i [s(X_i)]. \quad (29)$$

式中:  $\delta_i$  表示单个输入变量  $X_i$  的不确定性对结构失效概率的平均影响.

### 3 数值计算与实验验证

以一种国产数控机床电主轴为例,进行有限

元计算,所需的冷却介质参数以及结构材料参数如表 1 和表 2 所示.在完成有限元分析后采用实验的方法进一步验证有限元建模及分析流程与结果的准确性.搭建了电主轴温度及轴向热变形实验平台,在电主轴常见工作转速下,测量电主轴温度分布以及轴向热变形分布,得到了转速与温度和轴向热变形之间的数值关系.将有限元分析结果与实验结果进行对比验证.证明有限元模型的准确性,最后进行可靠性全局灵敏度相关计算.

表 1 冷却介质参数  
Table 1 Cooling medium parameters

介质名称	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	运动黏度×10 <sup>-6</sup> /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	普朗特数	导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )
20°冷却水	998.5	1.006	7.020	0.599
22°干空气	1.205	16.06	0.703	0.026
ISO VG32	—	21	—	—

表 2 电主轴材料参数  
Table 2 Material parameters of the motorized spindle

部件	材料名称	密度×10 <sup>3</sup>	导热系数	弹性模量×10 <sup>5</sup>	泊松比	线膨胀系数×10 <sup>-5</sup>
		kg·m <sup>-3</sup>	W·(m·K) <sup>-1</sup>	MPa		°C <sup>-1</sup>
外壳	HT300	7.35	50	2.1	0.32	1.22
轴承内、外圈	GCr15	7.83	42	2.09	0.32	1.28
滚珠	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.25	29.5	3.2	0.27	0.322
定子、转子	硅钢	7.70	12.9	2.0	0.26	1.28
转轴	20CrMo	7.84	50	2.1	0.28	1.35
轴环、挡圈	1045	7.81	48.15	2.1	0.30	1.18

#### 3.1 有限元模拟

根据图 3 所示的有限元建模及分析流程进行有限元计算.初值设定为冷却水进口压力 0.3 MPa, 输出压力 0.1 MPa, 进口流量 0.167 kg/s, 进口温度

20 °C, 环境温度 22 °C. 收敛准则以及残差设置为 10<sup>-4</sup>.

有限元计算结果如图 4 所示.图 4a 显示的是电主轴外壳温度分布,可以看出外壳前端和前挡

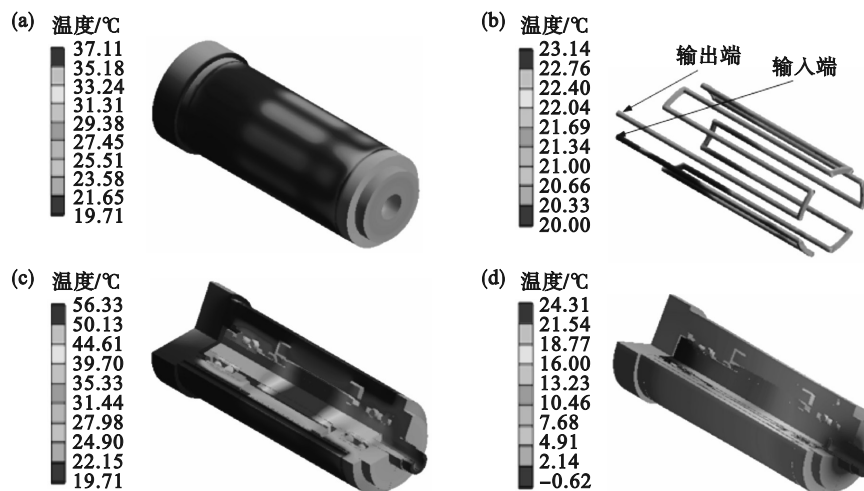


图 4 电主轴温度及热变形分布

Fig. 4 Temperature and thermal deformation distribution of the motorized spindle  
(a)—电主轴外壳温度; (b)—冷却水温度; (c)—电主轴温度; (d)—电主轴热变形.

圈处由于靠近生热部位(定子、转子和轴承)所以温度较高;外壳由于与冷却水接触所以整体温度较低.图 4b 显示的是冷却水的温度分布,冷却水在流动过程中温度逐渐升高,在入口处温度最低.图 4c 显示的是电主轴整体温度的分布,在生热部位(定子、转子和轴承)温度较高,其中温度最高处在转子与转轴交界处.

在完成温度场的求解之后,将节点的温度输入到结构分析模块中.设定外侧法兰为固定端,进行热变形分析.电主轴热变形分布如图 4d 所示,在电主轴端部热变形最大为 24.31  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 实验验证

为了验证建立的电主轴有限元建模及分析流程与结果的正确性,搭建了电主轴温度及轴向热变形实验平台,实验测量装置如图 5 所示.分别在不同转速下空转 60 min,用 Fluke-Ti32 热成像仪分别测量转轴端部、外壳前端和挡圈 3 个部分的温度.停止转动后,使用采样频率为 10 kHz 的电涡流位移传感器(sinocera CWY-DO-500)采集电主轴端部热变形量,经过数据采集系统(sinocera YE6251)将传感器采集到的结果传输到计算机进行数据处理.

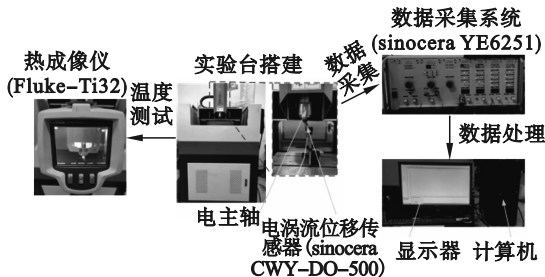


图 5 实验测量装置

Fig. 5 Experimental measurement device

温度以及热变形的仿真结果与实验结果对比如图 6 和图 7 所示,从图上结果可以看出有限元仿真结果与实验结果整体拟合效果较好,证明了有限元仿真模型的正确性.

### 3.3 可靠性全局灵敏度分析

对第 2 节提出的模型及全局灵敏度分析方法进行分析.电主轴在实际工作过程中受到不同因素影响,结构参数具有随机不确定性,主要考虑轴承所受轴向力、径向力、电主轴转速和冷却水流量 4 个因素对电主轴热变形量的影响,随机变量设定为正态分布<sup>[24]</sup>,变量分布如表 3 所示.

选取电主轴最大热变形量作为电主轴可靠性的评价指标.采用拉丁超立方抽样方法,抽取

100 组随机参数样本数据,基于有限元模型求解 100 组结构数据对应的电主轴最大热变形量.

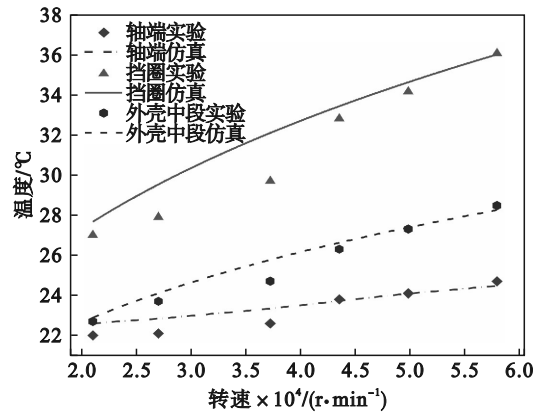


图 6 温度测试实验结果与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of the temperature test results and simulation results

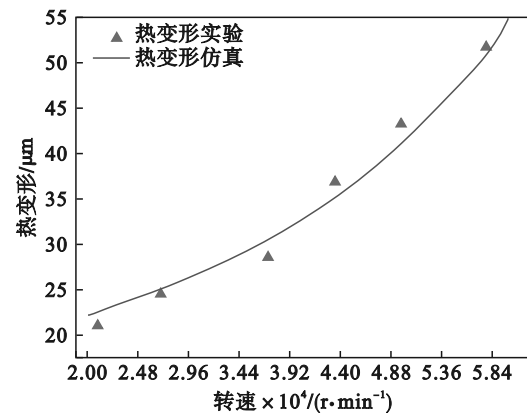


图 7 热变形测试实验结果与仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of the thermal deformation test results and simulation results

表 3 随机参数分布

Table 3 Random parameter distribution

随机变量	转速	冷却水流量	轴向力	径向力
	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	N	N
均值	60 000	0.167	350	300
变异系数	0.002	0.02	0.05	0.05

任取 50 组随机参数样本和相应的最大热变形量建立 Kriging 模型.将其余 50 组随机参数样本分别代入有限元模型和 Kriging 模型中进行计算,得到 50 组电主轴轴端热变形量的预测值与准确值的对比情况,结果如图 8 所示.图 9 是电主轴轴端热变形有限元仿真数值和 Kriging 模型预测值的相对误差,最大值为 0.147%,表明 Kriging 模型的预测值与有限元模型结果高度契合,证明本文所建立的 Kriging 模型具有较高的准确性.

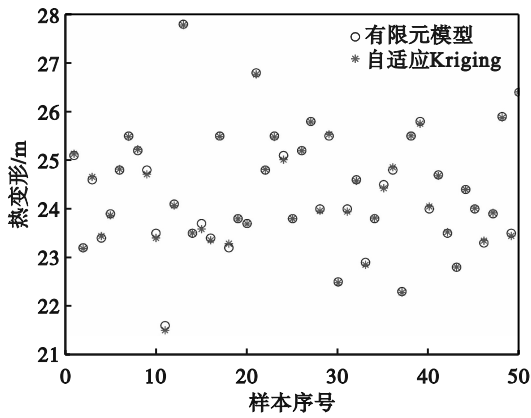


图 8 热变形有限元模型计算值与 Kriging 计算值对比  
Fig. 8 Comparison between the calculated values of the hot deformation finite element model and the Kriging calculation values

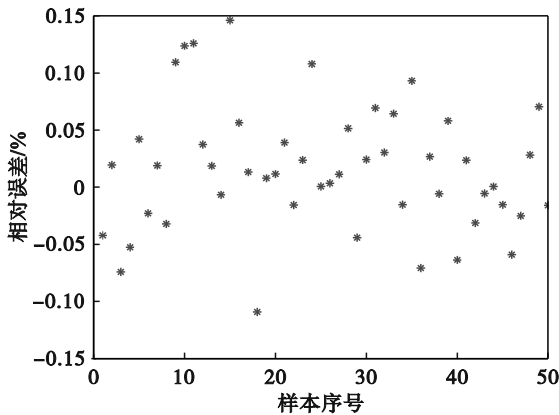


图 9 热变形有限元模型计算值与 Kriging 计算值相对误差  
Fig. 9 Relative error between the calculated values of the hot deformation finite element model and the Kriging calculation values

利用 Kriging 模型对随机变量进行可靠性全局灵敏度分析,研究随机变量对主轴热变形失效的影响程度,结果如图 10 所示.从图 10 可以看出,在全局范围内转速和冷却水流量对可靠度影响较大,轴向力和径向力对可靠度影响较小.

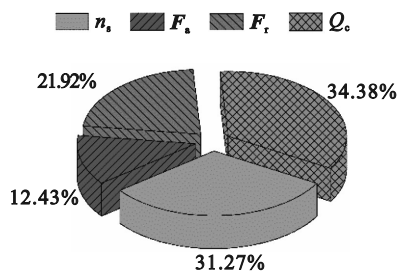


图 10 全局灵敏度分析结果  
Fig. 10 Global sensitivity analysis results

## 4 结 语

本文建立了电主轴热分析的有限元模型,通

过与实验结果对比,验证系统有限元模型的准确性.

考虑了实际加工过程中的轴承受力、电主轴转速以及冷却水流量等随机因素,使得分析结果更加符合真实工况,提出了一种以电主轴热变形位移为评价指标的可靠性评估方法,对于防止电主轴轴向热伸长量过大,影响加工质量,提高加工精度和可靠性具有重要意义.

通过 Kriging 模型方法对电主轴轴端热伸长量进行可靠性分析.结果表明,在全局范围内转速和冷却水流量对可靠度影响较大,轴向力和径向力对可靠度影响较小.在实际加工过程中应严格控制冷却水流量和转速.

## 参考文献:

- [1] Aalilija A, Gandin CA, Hachem E. A simple and efficient numerical model for thermal contact resistance based on diffuse interface immersed boundary method[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 166: 106817.
- [2] Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E, et al. Thermal issues in machine tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61(2): 771-791.
- [3] Cao H R, Zhang X W, Chen X F. The concept and progress of intelligent spindles: a review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 112: 21-52.
- [4] Zhang L L, Xuan J P, Shi T L, et al. Robust, fractal theory, and FEM-based temperature field analysis for machine tool spindle [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 111(5/6): 1571-1586.
- [5] Fang B, Cheng M N, Gu T Q, et al. An improved thermal performance modeling for high-speed spindle of machine tool based on thermal contact resistance analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 120(7): 5259-5268.
- [6] Ma C, Yang J, Zhao L, et al. Simulation and experimental study on the thermally induced deformations of high-speed spindle system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86: 251-268.
- [7] Yao X P, Hu T, Yin G F, et al. Thermal error modeling and prediction analysis based on OM algorithm for machine tool's spindle [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(7): 3345-3356.
- [8] Liu K, Li T, Li T J, et al. Thermal behavior analysis of horizontal CNC lathe spindle and compensation for radial thermal drift error [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(1): 1293-1301.
- [9] Zhang L X, Gong W J, Zhang K, et al. Thermal deformation prediction of high-speed motorized spindle based on biogeography optimization algorithm [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5): 3141-3151.
- [10] Lee J, Kim D H, Lee C M. A study on the thermal characteristics and experiments of high-speed spindle for machine tools [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(2): 293-299.
- [11] Harris T A, Kotzalas M N. *Essential Concepts of Bearing Technology*[M], 5th ed. New York: CRC Press, 2007.

- [12] Liu J L, Ma C, Wang S L, et al. Thermal-structure interaction characteristics of a high-speed spindle-bearing system [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 137:42-57.
- [13] Svenska Kullager-Fabriken. Rolling bearings catalogue [EB/OL]. (2018-10-12) [2022-03-24]. <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/errata/pages/rbc17000>.
- [14] 张雪亮. 新型高速电主轴轴承-轴芯热场分布规律与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.  
(Zhang Xue-liang. Distribution law and experimental study of heat field new high-speed motorized spindle bearing-spindle core [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.)
- [15] Jiang Z Y, Huang X Z, Chang M X, et al. Thermal error prediction and reliability sensitivity analysis of motorized spindle based on Kriging model [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127:105558.
- [16] Yan B, Yan K, Luo T, et al. Thermal coefficients modification of high speed ball bearing by multi-object optimization method [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 137:313-324.
- [17] 崔向昆. 高速电主轴温度分布及其热位移研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.  
(Cui Xiang-kun. Research on temperature distribution and thermal displacement of high speed spindle [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [18] Chien C H, Jang J Y. 3-D numerical and experimental analysis of a built-in motorized high-speed spindle with helical water cooling channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(17/18):2327-2336.
- [19] 黄贤振, 曹辉, 张义民. 基于蒙特卡罗方法的直角切削切削力概率特性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(2):254-258.  
(Huang Xian-zhen, Cao Hui, Zhang Yi-min. Probabilistic analysis of cutting force in orthogonal cutting based on using Monte-Carlo method [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, 36(2):254-258.)
- [20] Ding P F, Huang X Z, Li Y X, et al. Reliability optimization of cutting parameters considering the diameter error of slender shaft [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(10):4673-4683.
- [21] Liu H Z, Huang X Z, Yan M, et al. Dynamic response and time-variant reliability analysis of an eight-rod shock isolator [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(13):7041-7054.
- [22] 吕震宙, 宋述芳, 李璐祎, 等. 结构/机构可靠性设计基础[M], 西安: 西北工业大学出版社, 2019.  
(Lyu Zhen-zhou, Song Shu-fang, Li Lu-yi, et al. Reliability sensitivity analysis of angular contact ball bearing skidding [M], Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019.)
- [23] Cui L J, Lu Z Z, Zhao X P. Moment-independent importance measure of basic random variable and its probability density evolution solution[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(4):1138-1145.
- [24] 黄贤振, 朱会彬, 姜智元等. 角接触球轴承打滑可靠性灵敏度分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(12):1731-1738.  
(Huang Xian-zhen, Zhu Hui-bin, Jiang Zhi-yuan, et al. Fundamental of structure and mechanism reliability design [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(12):1731-1738.)