

机床回转工作台变形全局可靠性灵敏度分析

黄贤振^{1,2}, 马明斐¹, 李超¹, 王旭¹, 荣治明³

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 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, 沈阳 110819; 3. 大连海洋大学应用技术学院, 辽宁大连 116399)

摘要: 针对机床加工过程中, 回转工作台会因承受较大载荷而产生变形, 进而影响加工精度和一致性的问题, 提出了一种考虑随机因素影响的回转工作台变形行为的可靠性分析模型, 将回转工作台视为系统, 以回转工作台最大变形是否超过允许值为判别条件进行可靠性分析, 探究了在不同载荷作用下, 整个系统的全局可靠性变化规律, 随后计算了各参数对系统失效现象的全局灵敏度。研究表明: 工作台板、回转座、滑座的材料参数对回转工作台系统可靠性影响较大, 其中弹性模量的灵敏度指标大于密度, 泊松比最小。

关键词: 机械设计; 机床回转工作台; 静力学; 可靠性; 灵敏度

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-1906-09

DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20230947

Global reliability sensitivity analysis of deformation for machine tool rotary table

HUANG Xian-zhen^{1,2}, MA Ming-fei¹, LI Chao¹, WANG Xu¹, RONG Zhi-ming³

(1. School of Mechanical Engineering and 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 of Dalian Ocean University, Dalian 116399, China)

Abstract: In view of the problem that the rotary table will deform due to bearing large loads during machine tool processing, which will affect the processing accuracy and consistency, this paper proposes a reliability analysis model for the deformation behavior of the rotary table that considers the influence of random factors. The model treats the rotary table as a system, and uses the maximum deformation of the rotary table as the criterion for reliability analysis. The study explores the global reliability changes of the entire system under different load conditions and calculates the global sensitivity of each parameter to system failure. The results indicate that the material parameters of the table plate, rotary seat, and sliding seat have a significant impact on the reliability of the rotary table system, with the sensitivity index of the elastic modulus being greater than that of density and Poisson's ratio being the smallest.

Key words: mechanical design; machine tool rotary table; statics; reliability; sensitivity

收稿日期: 2023-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23B2098, U22B2087); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300160).

作者简介: 黄贤振(1982-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 机械与系统可靠性. E-mail: xzhhuang@mail.neu.edu.cn

通信作者: 荣治明(1979-), 男, 实验师, 硕士. 研究方向: 机械设计, 机床结构分析. E-mail: rongzhiming@dlou.edu.cn

0 引言

机床回转工作台是机床上的一种重要附件,其主要功能是实现工件的旋转运动,用于机床上多面或多角度的加工。回转工作台的作用在于扩大工件的加工范围、提高加工效率并减少工件在加工过程中的重复夹紧和定位,从而提高加工的精度和一致性。因此,回转工作台的精度和可靠性对机床加工精度和加工效率具有重要影响。然而,在加工过程中,回转工作台会承受较大的载荷,从而产生变形,进而影响加工精度和一致性。因此,对回转工作台进行可靠性研究,以确保其稳定性和精度,对提高机床的加工质量和生产效率具有关键性作用。

国内外学者对机床工作台进行了大量研究。周鸿斌等^[1]采用球杆斜置的测试方法,发现垂直度误差和比例不匹配误差是影响工作台精度的主要因素。梅雪松等^[2]建立了一种可以根据滑动速度、表面接触物体的油膜厚度等计算摩擦力的机床工作台数学模型。Winiarski等^[3]基于有限元方法对工作台的主要内部热源进行分析计算,得到了工作台的温度分布云图与热变形情况。Bok等^[4]使用有限元结构分析和遗传算法对大型落地式镗床工作台进行了轻量化和高刚性优化设计。Deng等^[5]研究了叶脉分布规律,实现了基于叶脉分布规律的高速机床工作台结构仿生设计。Gao等^[6]成功将蜂窝结构应用于高速机床工作台的结构设计中,减轻了工作台的质量,减小了快速移动时产生的惯性力。Liu等^[7]提出一种考虑了导轨位移耦合和位置偏差效应的工作台系统5自由度动力学模型,并通过实验方法验证了所提动力模型的准确性。Wang等^[8]建立了考虑非线性接触行为的机床工作台系统3自由度动力学模型,以获得振动特性。

在上述研究及仿真分析中,一般假设机床回转工作台的参数是确定且无误差的。然而,在实际制造和加工过程中,存在许多随机因素^[9],这些因素会导致机床回转工作台参数具有一定的随机不确定性,从而给回转工作台的可靠性评估带来较大的误差。因此,准确确定机床设计中参数的不确定度已成为提高数控机床可靠性的一个新的改进方向。文献^[10]提出了一种新颖的机床可靠性分配方法。文献^[11]整合了直觉梯形模糊数和性能排序技术,实现了机床可靠性的灵活配置。

文献^[12]为全面评价5轴数控机床的可靠性,建立了基于物元理论的可靠性评估模型,综合构建了评估指标体系,并采用相关函数和层次分析法确定了各评估指标的权重。文献^[13]为了分析数控机床的可靠性,提出一种三参数威布尔混合模型,适用于多种失效模式和原因的多台数控机床失效数据建模。Kharoufeh等^[14]提出了两个可靠性评估模型,第一个模型检查了环境是时间非齐次连续时间马尔可夫链的情况;第二个模型假设环境是有限空间上的时间齐次半马尔可夫过程,利用此方法得出了数控机床的瞬时状态可靠性。Theodor等^[15]运用基于工艺选择和生产率的机械故障预测方法来预测机床可靠性。Li等^[16]为了降低机床可靠性改进时选择分析对象的盲目性,提出了关键元动作单元的概念并给出了相应的提取方法。Cheng等^[17]基于蒙特卡洛数学仿真方法,建立了机床加工精度可靠性和灵敏度分析模型。本文以牙盘式回转工作台为例,综合考虑随机因素对回转工作台参数的影响,将回转工作台力学性能分析模型和回转工作台表面允许最大变形的判定依据相结合,以回转工作台在受载荷作用下产生的最大变形是否超过允许值为判别条件,建立极限状态方程,提出一种回转工作台变形行为的可靠性分析模型。并通过自适应Kriging模型对数据进行拟合,进行可靠性灵敏度分析,以确定回转工作台结构参数对变形现象的影响程度。该模型为减少或避免回转工作台发生过大变形导致机床在加工工件时出现较大误差,影响加工精度和一致性提供了理论依据。

1 回转工作台结构及工作原理

转台外观如图1所示,由工作台板、回转座、鼠牙盘、滑座4个主要部件组成,通过滑座与导轨和丝杆连接。转台具体结构如图2所示,图2中,II油口开始给油,活塞经过回转座让上牙盘与下

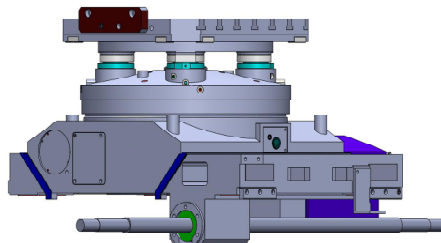


图1 牙盘式回转工作台

Fig. 1 Tooth disc-type rotary table

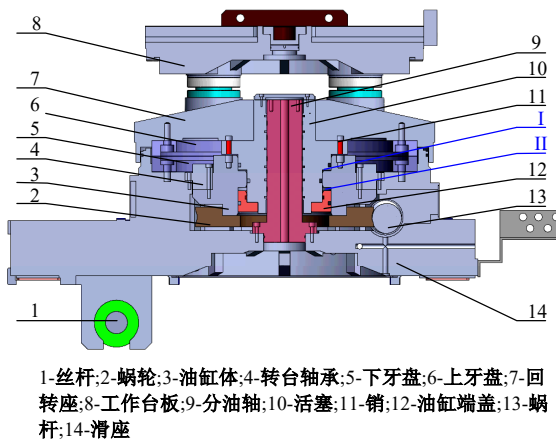


图 2 牙盘式回转工作台结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of tooth disc-type rotary table

牙盘啮合在一起,实现回转座的定位与夹紧,这时滑座、上下牙盘、回转座与工作台板成为一个整体,可以切削加工。当 I 油路开始进油时,活塞上升,上下牙盘脱离,这时可以通过蜗轮蜗杆驱动油缸体转动,油缸体通过销带动回转座与工作台板一起转动,实现回转工作台转动。

2 回转工作台力学性能分析

有限元分析可以通过模拟物体的真实工作状态,预测物体的力学性能,并可视化展示物体的应力分布、变形情况等。本文采用有限元方法分析回转工作台的力学性能,具体流程如图 3 所示。

步骤 1 几何模型构建

在切削加工过程中,工作台处于夹紧状态,工作台、回转座、上下牙盘与滑座成为一个整体,为了提高有限元分析的计算精度及计算效率,把对回转工作台静力分析影响较小的一些结构(如倒角、螺栓、键槽、油路等)进行了简化,同时将不关注结构只考虑质量的电机、带轮等零件转化为质量单元,并建立如图 4 所示的有限元分析模型。

步骤 2 参数及边界条件设置

结合回转工作台的实际工作情况,忽略导轨与轴承刚性,对滑座底部的 4 个面施加固定约束,对丝杆与轴承接触的部位施加圆柱约束,驱动电机、电机罩及带轮和其他附属结构的重力等效为力矩,蜗杆与其配套轴承和其他附属结构等效为力。

接触设置方面,在回转工作台内部可以相对运动的表面之间施加不分离接触,其他相互固定的零件表面之间施加绑定接触,赋予相关材料参

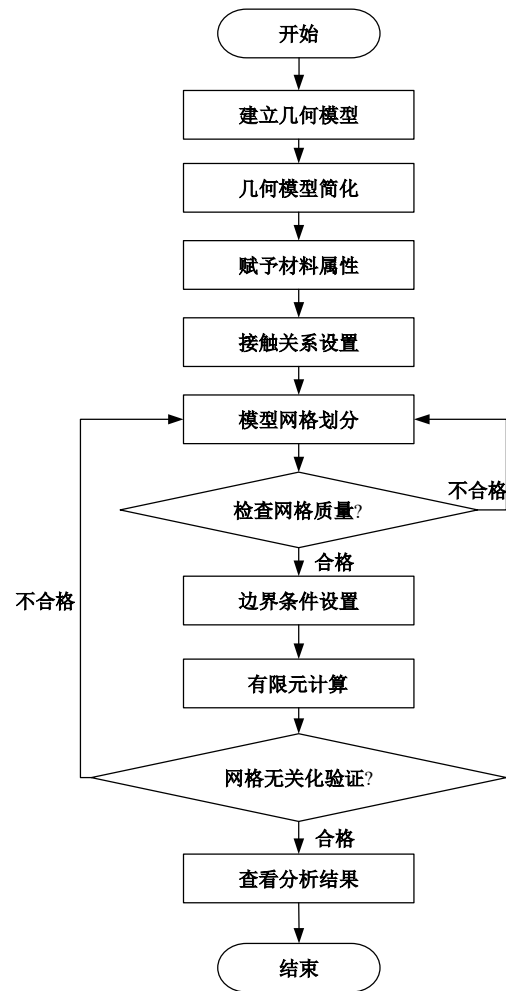


图 3 回转工作台力学性能分析流程图

Fig. 3 Flow chart of mechanical performance analysis of rotary table

数,对回转工作台整体结构进行静力学分析。

步骤 3 网格无关性验证

网格无关性验证是确保有限元分析模型准确性的一种重要方法。在有限元分析中,网格的大小直接影响模型的预测结果。但过多的网格数量会增加计算时间成本。因此,在工程应用中,需要在计算精度和计算时间之间寻找平衡点。验证网格无关性的步骤如下:①确定模型和边界条件,并选择一个适当的网格数量作为初值;②利用数值方法在初值网格上求解该模型,得到数值解;③逐步增加网格数量,并保持其他条件不变。对每个网格数量,利用数值方法在对应的网格上求解该模型,得到数值解;④比较相邻两次数值解之间的误差。如果误差在可接受的范围内,则认为该网格数量已经达到精度要求,验证完成;⑤如果误差超出可接受范围,则需要进一步增加网格数量,重复步骤③④,直到满足误差要求。

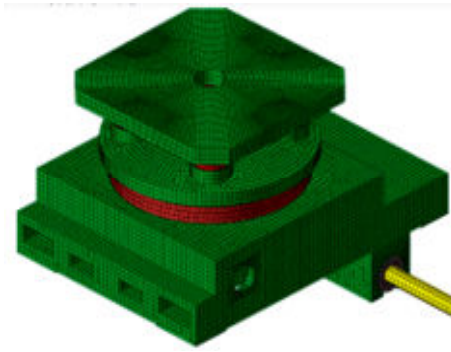


图4 回转工作台有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the rotary table

3 回转工作台系统全局可靠性灵敏度分析

在机械加工和制造过程中,各加工参数均有其公差,且很多加工和测量误差是无法避免的,回转工作台各个零件的材料参数都具有一定的随机性和不确定性。如果在分析过程中认为这些参数是固定的,将会对可靠性的主观评定造成很大的误差。因此,在分析和计算回转工作台可靠性的过程中,要考虑各个零件材料参数随机性的影响。故可将对整个结构影响较大的工作台板、回转座、鼠牙盘、滑座及丝杆的材料参数视作分析过程中的随机变量。将回转工作台视为系统,在假设系统中各个零件其他参数相同的条件下,确定出系统随机变量为:

$$\mathbf{X} = [\rho_1, E_1, \mu_1, \rho_2, E_2, \mu_2, \rho_3, E_3, \mu_3]^T \quad (1)$$

式中: ρ_1 为丝杆材料低合金钢的密度, E_1 为其弹性模量, μ_1 为其泊松比; ρ_2 为鼠牙盘材料高级氯化钢的密度; E_2 为其弹性模量; μ_2 为其泊松比; ρ_3 为工作台板、回转座及滑座材料灰铸铁的密度; E_3 为其弹性模量; μ_3 为其泊松比。

3.1 可靠性分析

对回转工作台系统,考虑不确定因素的影响,以回转工作台系统整体的最大Z向变形值是否超过允许最大变形为判别条件,建立极限状态函数为:

$$G = g(\mathbf{X}) = r^* - R(x) \quad (2)$$

式中: $g(\mathbf{X})$ 为极限函数表达式; r^* 由回转工作台用户手册得到,表示工作台板允许的最大平面度误差为0.02 mm,本文中将其作为工作台系统允许的最大Z向变形, $R(x)$ 为Z向变形响应值。

函数 $G > 0$ 时,表示该回转工作台系统处于可靠状态,对随机变量的概率密度积分可得到系统

可靠度或可靠性概率,用 P_f 表示。

$$P_f = \int_{G > 0} \cdots \int f_X(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n \quad (3)$$

对上述有限元模型计算出的动态参数数据如采用Monte Carlo^[18]方法计算可靠度计算量很大,为兼顾计算精度及计算效率,提出使用自适应Kriging^[19]模型来代替上述过程。

Kriging代理模型是一种基于空间插值的统计学方法,它旨在通过最小化预测值与真实值之间的方差来进行拟合,从而实现方差最小的无偏估计。该模型具有全局近似和局部随机误差相结合的特点^[20],可以表示为:

$$g_K(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{X}) \beta_i + z(\mathbf{X}) \quad (4)$$

式中: g_K 为Kriging模型; $f(\mathbf{X})$ 为随机向量 \mathbf{X} 的基函数; β 为回归函数待定系数,其值可通过已知的响应值估计得到; p 为基函数的个数; $z(\mathbf{X})$ 为一随机过程,其协方差矩阵可表示为:

$$\text{Cov}[z(\mathbf{x}^{(i)}), z(\mathbf{x}^{(j)})] = \sigma^2 [R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})] \quad (5)$$

式中: $(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$ 为任意两个样本点; $R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$ 为带有参数 θ 的相关函数,反映样本点之间的空间相关性,选用计算效果最好的高斯函数作为相关函数,其表达式为:

$$R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \exp\left(-\sum_{k=1}^m \theta_k \left|\mathbf{x}_k^{(i)} - \mathbf{x}_k^{(j)}\right|\right) \quad (6)$$

未知点 x 处的响应估计值为:

$$g_c(x) = \mathbf{f}^T(x) \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\beta}) \quad (7)$$

式中: $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值; \mathbf{g} 为训练样本数据的响应值构成的列向量; \mathbf{F} 为由 m 个样本点处的回归模型组成的 $m \times p$ 阶矩阵; $\mathbf{r}(x)$ 为训练样本点和预测点之间的相关函数向量。

$\hat{\beta}$ 和方差估计值 $\hat{\sigma}^2$ 分别为:

$$\hat{\beta} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g} \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\beta}) / m \quad (9)$$

相关参数 θ 可以通过求极大似然估计的最大值得到,即:

$$\max F(\theta) = -\frac{m \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|}{2} \quad (10)$$

得到的 θ 值构成的Kriging模型为拟合精度最优的代理模型。符合高斯分布的情况下: $g_k(x) \sim N(\mu_{g_k}(x), \sigma_{g_k}^2(x))$ 。训练点处 $\mu_{g_k}(x_i) = g(x_i)$ 且标准差 $\sigma_{g_k}(x_i) = 0$ 。其他输入变量样本对应的功能函数值的方差一般不是0。当方差比

较大时,意味着在 x 处的估计是不正确的。因此, $\sigma_{g_s}^2(x)$ 的预测值可以用来衡量代理模型在 x 位置处估计的准确程度,进而为更新 Kriging 代理模型提供了一个很好的指标。 U 学习函数是一种应用较为广泛的自适应学习函数,其定义如下:

$$U(x) = \left| \frac{\mu_{g_s}(x)}{\sigma_{g_s}(x)} \right| \quad (11)$$

自适应 Kriging 代理模型结合 Monte Carlo 数字模拟法求解可靠性问题的具体思路为:首先,根据输入变量的联合概率密度函数,使用 Monte Carlo 数字模拟方法生成一组输入变量的随机样本,构建 MCS 样本池。接着,利用 U 学习函数对 MCS 样本池中的数据进行分析,找出对失效面拟合存在较大误差的数据点。然后,通过调整 Kriging 模型的参数,提高模型的拟合精度。最终,通过不断迭代,确保 Kriging 模型达到一定的置信水平,并得到较为准确的系统失效概率评估结果。

根据上述分析,基于自适应 Kriging 模型拟合方法的可靠性分析流程如图 5 所示。相较于普通 Kriging 方法,自适应 Kriging 代理模型结合 Monte Carlo 数字模拟法在保持高效性和准确性的基础上,利用 U 学习函数迭代更新 Kriging 模型,能够更好地适应复杂的系统失效概率分布,提高模型的拟合精度和预测精度,从而更加准确地评估系统的可靠性。

3.2 全局可靠性灵敏度分析

基于失效概率的全局灵敏度方法相较于传统的局部可靠性灵敏度方法,在衡量输入变量对结构失效概率的影响时更具全面性。该方法能够考虑输入变量在其整个分布域内的变化对结构失效概率的平均影响。通过基于失效概率的全局灵敏度分析,可以确定对结构失效概率影响显著的不确定性因素,从而有助于结构的可靠性设计。

根据贝叶斯公式,将条件失效概率表示为:

$$P\{F|X_i\} = \frac{P\{F\} f_{X_i}(x_i|F)}{f_{X_i}(x_i)} \quad (12)$$

式中: $f_{X_i}(x_i|F)$ 为当结构失效时输入变量 X_i 的条件概率密度函数。

$\delta_i^{P\{F\}}$ 可以表示为:

$$\delta_i^{P\{F\}} = \frac{1}{2} \left| P\{F\} - P\{F|X_i\} \right| f_{X_i}(x_i) dx_i \quad (13)$$

在一个具体问题中, $\delta_i^{P\{F\}}$ 可以表示输入变量

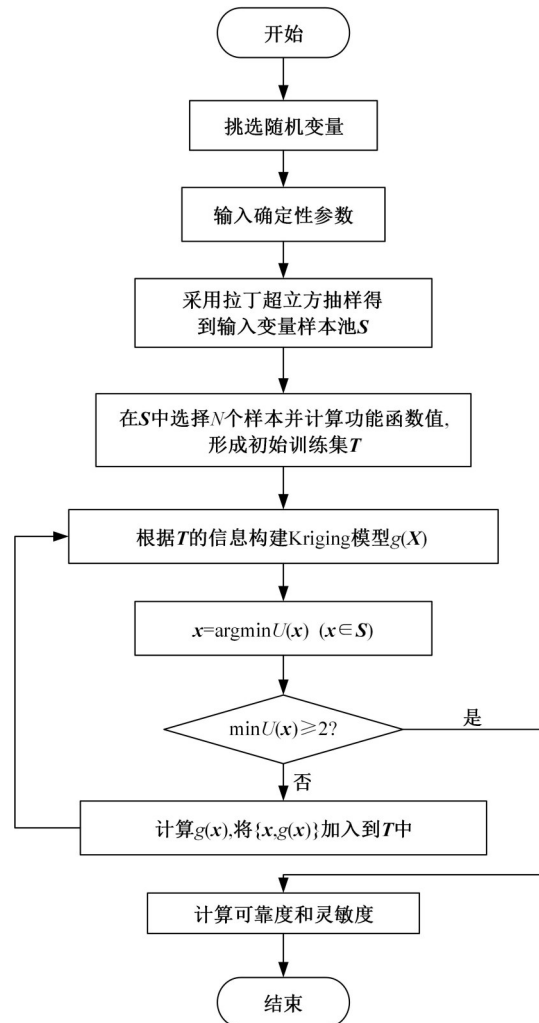


图 5 基于自适应 Kriging 模型的可靠性分析流程图

Fig. 5 Flow chart of reliability analysis based on adaptive Kriging model

的无条件概率密度与条件概率密度的差异。通过比较输入变量的无条件概率密度函数与结构失效条件下输入变量的条件概率密度函数之间的差异来衡量输入变量对结构失效概率的影响。估计 $\delta_i^{P\{F\}}$ 的过程如下。

(1) 根据输入变量 X 的联合概率密度函数 $f_X(x)$ 产生一组样本 $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)}\}$, N_F 为失效样本数量,结构失效概率 $P\{F\}$ 为:

$$\hat{P}\{F\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_F} I_F(x^{(j)}) = \frac{N_F}{N} \quad (14)$$

(2) 从 N 个样本中挑选出失效样本 $\{x_F^{(1)}, x_F^{(2)}, \dots, x_F^{(N_F)}\}$, 以失效样本来估计所有输入变量 $X_i (i=1, \dots, n)$ 的条件概率密度函数,记作 $\hat{f}_{X_i}(x_i|F) (i=1, \dots, n)$ 。

(3) 估计 $\delta_i^{P\{F\}} (i=1, \dots, n)$:

$$\hat{\delta}_i^{P(F)} = \frac{1}{2} \hat{P}\{F\} \int_{x_i} |f_{x_i}(x_i) - \hat{f}_{x_i}(x_i|F)| dx_i \quad (15)$$

4 算例分析

本算例选用卧式加工中心机床牙盘分度回转台进行分析研究,其主要结构与其材料属性如表 1 所示。

表 1 回转工作台主要结构与材料属性

Table 1 Main structure and material properties of the rotary table

零件	材料	质量/kg
工作台板	HT300	188
回转座	HT300	150
滑座	HT300	580
鼠牙盘	38CrMoAlA	20×2
分油轴	45	13.7
活塞	45	39
油缸体	45	62
油缸端盖	45	5.6
蜗轮	ZQSn10-1	29.6
蜗杆	38CrMoAlA	9.2
转台轴承	GCR15SiMn	25

4.1 仿真结果分析

考虑网格数量对计算结果的影响,按照网格数量为 2.7 万~44 万进行网格无关化验证。如图 6 所示。由图 6 可看出,当网格数量小于 15.7 万时,计算结果的误差较大,计算时间相对较短;当网格数量大于 15.7 万时,计算结果的误差较小,但计算时间显著增加。因此,为了保证计算精度的同时,尽可能地控制计算时间成本,选择

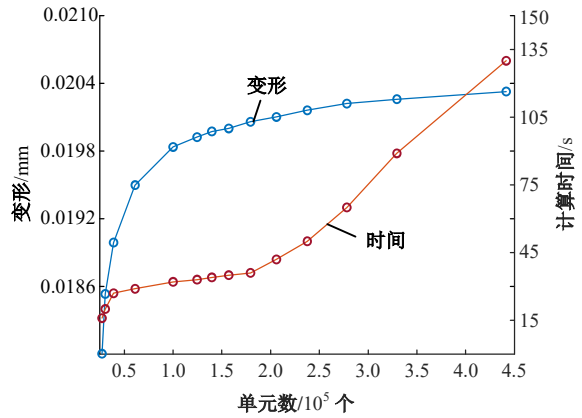


图 6 不同网格数量计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation results of different grid numbers

15.7 万的网格数量。

根据厂商提供的数据,该回转工作台最大承载载荷为 12 000 N,为了解回转工作台在负载作用下的变形及应力应变分布情况,采用本文提出的模型,对回转工作台系统在载荷为 12 000 N 时进行数值计算,提取回转工作台整体结构的变形及应力应变结果,得到系统最大变形发生于工作台板靠近丝杆的一侧,大小为 0.008 7 mm,系统最大应力应变均发生于滑座底部靠近丝杆一侧,大小分别为 5.94 MPa 和 5.68×10^{-5} 。整体结构的变形及应力应变云图如图 7 所示。

为了解工作台在不同负载作用下的变形情况,对工作台板上表面施加 5 组静载荷,提取的整体结构变形及应力应变结果如图 8 所示。结果表明:系统的变形及应力应变均与所承载荷呈线性关系。

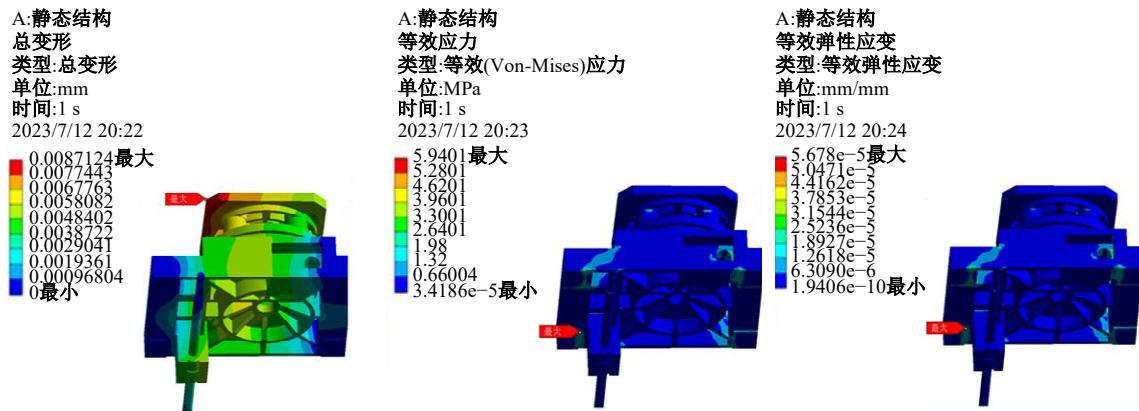


图 7 整体结构的变形及应力应变云图

Fig. 7 Deformation and strain deformation nephogram of the overall structure

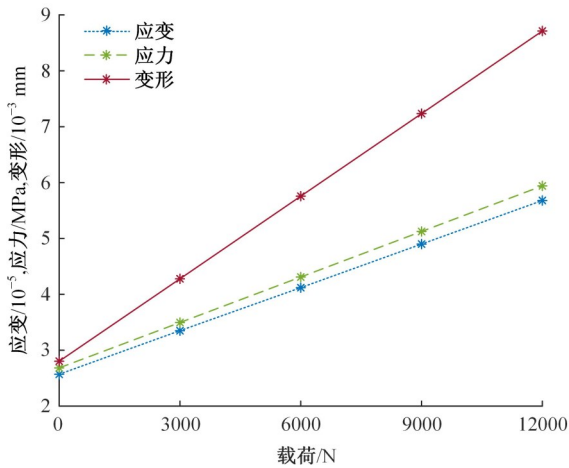


图 8 整体结构的变形及应力应变随载荷变化的情况

Fig. 8 Deformation and stress and strain of the overall structure change with load

4.2 Kriging 模型拟合方法验证

通过有限元分析得出,工作台板上的载荷达到 39 522 N 时,回转工作台系统的最大 Z 向变形值为 0.02 mm,此时系统处于极限状态,为准确预测回转工作台系统的可靠性,反映系统中材料参数的不确定性,采用拉丁超立方抽样法,随机抽取 10^6 组材料参数数据样本作为输入变量 MCS 样本池,抽取的样本数据如表 2 所示。

表 2 回转工作台参数随机变量表

Table 2 Rotary table parameter random variable table

参数	数值	分布	变异系数
$\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	正态分布	0.05
E_1 / GPa	212.5	正态分布	0.05
μ_1	0.29	正态分布	0.05
$\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	正态分布	0.05
E_2 / GPa	210	正态分布	0.05
μ_2	0.28	正态分布	0.05
$\rho_3 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 200	正态分布	0.05
E_3 / GPa	110	正态分布	0.05
μ_3	0.28	正态分布	0.05

从样本池中抽取 200 组样本数据,每组分别进行有限元设置与求解,得到的系统最大 Z 向变形值为输出变量,从而得到相应的功能函数样本值,利用这少量的输入-输出信息建立初始 Kriging 代理模型,根据 U 学习函数对 Kriging 代理模型更新 12 次后满足了自适应学习过程的收敛条件。自适应学习次数与置信水平的关系如图 9 所示。

另随机抽取 50 组数据样本,分别通过有限元方法和已建立的 Kriging 模型进行拟合计算,所得最大 Z 向变形结果比对如图 10 所示,并统计两者

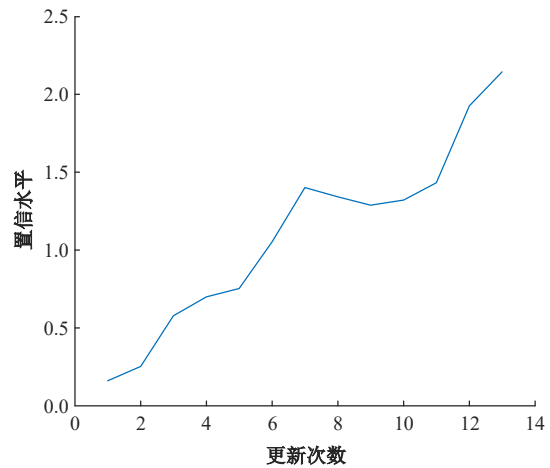


图 9 自适应学习次数与置信水平的关系

Fig. 9 Relationship between the number of adaptive learning and the confidence level

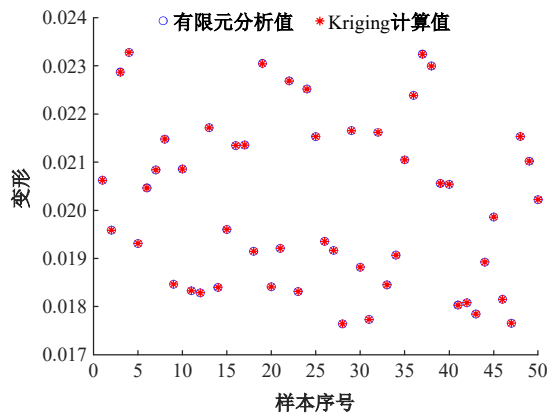


图 10 Kriging 计算值与有限元分析值比对

Fig. 10 Comparison of Kriging calculated value and finite element analysis value

绝对误差分布如图 11 所示。可见,它们之间的误差非常小,从而验证 Kriging 模型具很高的拟合精度。

4.3 工作台系统可靠性灵敏度分析

根据建立的极限状态函数,本文探究了随机因素对回转工作台系统整体变形的影响,对样本池中的 10^6 组样本都施加 35 922 N 的载荷,系统最大 Z 向变形的概率密度如图 12 所示,可以看出受随机因素的影响,系统的最大变形主要分布在 0.018~0.022 mm。

在不同载荷下进行可靠性分析得到系统可靠性随载荷的变化规律如图 13 所示。

可得出结论:当施加的载荷为 35 922 N 时,回转工作台系统的可靠度仅为 0.500 4,这表明由于随机因素的影响,系统发生失效的概率仍然较

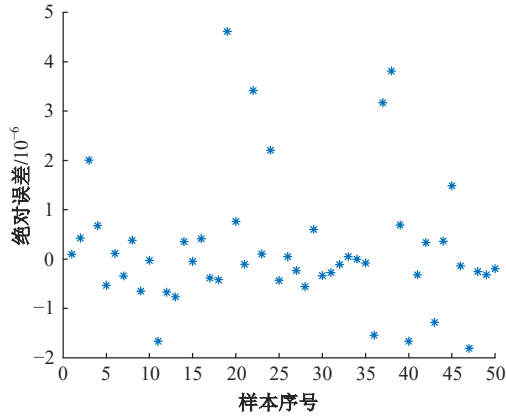


图 11 Kriging 计算值与有限元分析值的绝对误差
Fig. 11 Absolute error between Kriging calculated value and finite element analysis value

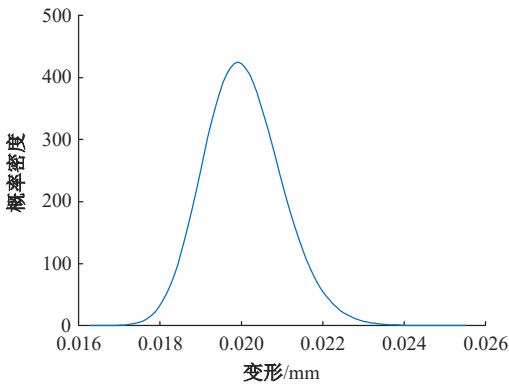


图 12 系统变形的概率密度

Fig. 12 Probability density of system deformation

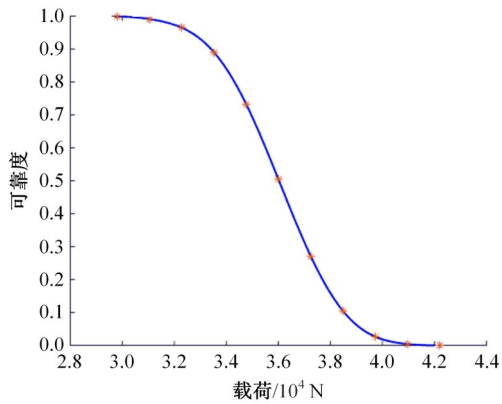


图 13 系统可靠度随载荷变化

Fig. 13 System reliability changes with load

高。而当载荷降至 29 800 N 时,系统的可靠度显著提高至 0.998 9,这意味着回转工作台系统发生失效的概率已经大大降低。随着载荷的增大,可靠度降低。

为了探究随机变量的变化对工作台系统可靠性的影响程度,利用建立的 Kriging 模型,采用基于贝叶斯公式的全局灵敏度分析方法,对随机变

量进行了分析,如图 14 所示,可得出结论:工作台板、回转座和滑座的材料参数对回转工作台系统可靠性影响最大。其中,弹性模量的灵敏度指标最大,为 0.222 4,而密度和泊松比的灵敏度指标次之,分别为 0.020 9 和 0.015 3。

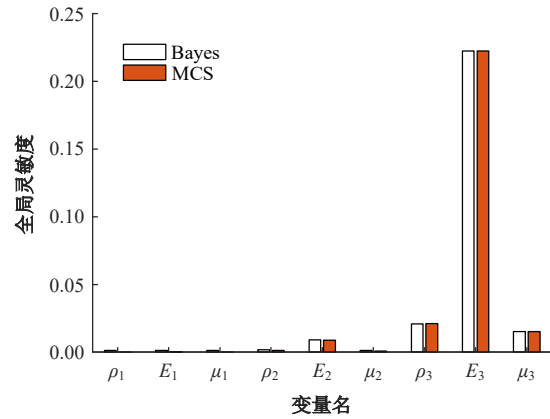


图 14 全局灵敏度分析

Fig. 14 Global sensitivity analysis

相比之下,鼠牙盘的材料参数对回转工作台系统可靠性影响较小,且其灵敏度指标均小于 0.01。同样是弹性模量的灵敏度指标大于密度和泊松比,其灵敏度指标分别为 0.009 0、0.001 7 和 0.001 5。这表明,弹性模量是鼠牙盘材料参数对系统可靠性产生影响的主要因素。

另外,丝杆材料参数的随机性对回转工作台系统可靠性影响非常小。因此,在设计和优化回转工作台系统时,应该重点关注工作台板、回转座和滑座的材料参数,特别是弹性模量的影响。

5 结束语

本文建立了回转工作台有限元分析模型,通过力学性能分析探究了回转工作台整体及主要部件的变形与应力分布情况,对回转工作台系统进行全局可靠性灵敏度分析,以系统最大 Z 向变形是否超过 0.02 mm 为判据,考虑了工作台材料参数的随机性,对防止工作台在加载时发生过大变形,从而提高回转工作台系统可靠性具有重要意义。仿真结果表明,工作台板、回转座、滑座的材料参数对回转工作台系统可靠性影响最大,其中弹性模量的灵敏度指标大于密度,泊松比最小;鼠牙盘的材料参数对回转工作台系统可靠性影响次之,同样是弹性模量的灵敏度指标大于密度,泊松比最小;丝杆材料参数的随机性对回转工作台系统可靠性影响很小。

参考文献:

- [1] 周鸿斌, 张建民, 付红伟, 等. PRS-XY 型混联数控机床工作台误差补偿技术[J]. 北京理工大学学报, 2007(2): 120-124.
Zhou Hong-bin, Zhang Jian-min, Fu Hong-wei, et al. Error calibration of the X-Y table of a PRS-XY type hybrid CNC machine tool[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2007(2): 120-124.
- [2] 梅雪松, 陶涛, 堤正臣, 等. 高速、高精度数控伺服工作台摩擦误差的研究[J]. 机械工程学报, 2001(6): 76-81.
Mei Xue-song, Tao Tao, Di Zheng-chen, et al. Study on friction error of high-speed high-precision NC servo table[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001(6): 76-81.
- [3] Winiarski Z, Kwaśny W, Jędrzejewski J, et al. Modeling thermal deformation of tilting rotary table with direct drive system[J]. Journal of Machine Engineering, 2010, 10(4): 26-40.
- [4] Bok H L, Han J O, Hwan C O, et al. Structural design optimization of the rotary table of a floor type boring machine for minimum weight and compliance by using GA[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271-272: 1421-1426.
- [5] Deng H X, Zhao L, Ma J F, et al. Structural bi-onic design for high-speed machine tool working table based on distribution rules of leaf veins[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(8): 2091-2098.
- [6] Gao Q D, Zhang F, Mao Y Z, et al. Application of honeycomb structure in machine tool table[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1377(308-310): 1233-1237.
- [7] Liu C, Zhao C Y, Wen B C. Investigation on coupled vibration of machine tool table system with position deviations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(7/8): 1-17.
- [8] Wang W, Li C Y, Zhou Y X, et al. Nonlinear dynamic analysis for machine tool table system mounted on linear guides[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(3): 2033-2045.
- [9] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 27-35.
Xie Li-yang. Issues and commentary on mechanical reliability theories, methods and models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 27-35.
- [10] Cheng Q, Kang Y B, Yang C B, et al. A new reliability allocation method for machine tools based on ITrFNs and AHP-GRA[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124(11/12): 4019-4032.
- [11] Cheng Q, Wang C, Sun D Y, et al. A new reliability allocation method for machine tools using the intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers and TOPSIS[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 124(11/12): 1-12.
- [12] Wang P J, Wang H J, Chen X M. Research on reliability comprehensive evaluation method of five-axis CNC machine tools based on AHP and extension theory[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8599-8603.
- [13] Wang Z, Yang J, Wang G, et al. Application of three-parameter Weibull mixture model for reliability assessment of NC machine tools: a case study[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2011, 225(11): 2718-2726.
- [14] Kharoufeh P J, Cox M S, Oxley E M. Reliability of manufacturing equipment in complex environments [J]. Annals of Operations Research, 2013, 209(1): 231-254.
- [15] Theodor F, Jack S H. Impact of machining parameters on machine reliability and system productivity [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(2): 296-304.
- [16] Li Y L, Zhang X G, Zhang W, et al. Reliability and modal analysis of key meta-action unit for CNC machine tool[J]. IEEE Access, 2019, 7: 23640-23655.
- [17] Cheng Q, Zhao H W, Zhao Y S, et al. Machining accuracy reliability analysis of multi-axis machine tool based on Monte Carlo simulation[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018, 29(1): 191-209.
- [18] 闫明, 张义民, 孙志礼, 等. 机械零件相关失效可靠度及灵敏度计算的 Monte Carlo 方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 834-837.
Yan Ming, Zhang Yi-min, Sun Zhi-li, et al. Monte Carlo method for computing of reliability and sensitivity of mechanical components with dependent failure modes[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(6): 834-837.
- [19] Chen J, Qiu H B, Gao L, et al. Real-time estimation error-guided active learning Kriging method for time-dependent reliability analysis[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 77(1): 82-98.
- [20] Sun Z L, Wang J, Li R, et al. LIF: a new Kriging based learning function and its application to structural reliability analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 157: 152-165.