

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230320

数控机床回转工作台可靠性优化

黄贤振^{1,2}, 马明斐¹, 姜智元¹, 邱开慧³

(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. 武汉钢铁有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要: 为了保证回转工作台刚度的同时尽可能地降低质量, 并提高其可靠性, 提出了一种回转工作台可靠性优化方法. 该方法考虑了回转工作台内部结构之间装配关系的不变性, 并引入了随机不确定性因素. 通过灵敏度分析确定对回转工作台性能影响较大的尺寸参数, 并进行优化. 与传统优化方法不同, 本文采用Kriging代理模型代替耗时的有限元分析. 此外, 在优化过程中引入了一种高效的元启发式算法来求解所提出的可靠性优化问题. 随后, 研究了各种参数配置对回转工作台变形可靠性的影响. 最后, 通过实例验证了所提优化方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 机床回转工作台; 刚度; Kriging代理模型; 可靠性评估; 可靠性优化

中图分类号: TG 659 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)05-0087-08

Reliability Optimization of CNC Machine Tool Rotary Tables

HUANG Xian-zhen^{1,2}, MA Ming-fei¹, JIANG Zhi-yuan¹, QIU Kai-hui³

(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, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Wuhan Iron & Steel Co. Ltd, Wuhan 430080, China. Corresponding author: HUANG Xian-zhen, E-mail: xzhhuang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To ensure the stiffness of the rotary table while minimizing its weight and enhancing its reliability, a reliability-based design optimization (RBDO) method is proposed for the rotary table. This method takes into account the invariance of the assembly relationships between the internal structures of the rotary table, and also incorporates the random uncertainty factors. Through sensitivity analysis, size parameters that significantly affect the performance of the rotary table are identified, and optimization design is conducted on these parameters. Unlike the traditional optimization methods, a Kriging surrogate model is applied to replace time-consuming finite element analysis. Furthermore, an efficient meta-heuristic algorithm is introduced during the optimization process to address the proposed RBDO problem. Subsequently, the impact of various parameter configurations on the deformation reliability of the rotary table is investigated. Finally, the effectiveness and robustness of the proposed optimization method are validated through practical examples.

Key words: machine tool rotary table; stiffness; Kriging surrogate model; reliability assessment; reliability optimization

机床回转工作台是机床的重要组成部分, 其主要作用是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. 回转工作台的静态刚度对整机的加工精度和稳定性起着关

键作用, 而其结构尺寸对静态刚度有重要影响. 因此, 对回转工作台进行结构优化, 以降低制造成本、减少资源损耗^[1], 同时提高其可靠性, 对于提高机床的加工质量和生产效率具有重要的意义.

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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, 山东定陶人, 东北大学教授, 博士生导师.

国内外学者对机床结构优化进行了大量研究. Bok 等^[2]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^[3]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, 并用仿真和实验对优化结果进行验证, 优化后工作台变形减少约 34%. Gao 等^[4]成功将蜂窝结构应用于高速机床工作台的结构设计中, 降低了工作台的质量, 减小了快速移动时产生的惯性力. Zhao 等^[5]提出了一种基于多工况拓扑优化的大型箱体结构在动荷载作用下的加筋板布局设计方法, 以超重型车铣加工中心的横梁为例, 优化结果表明, 横梁的刚度和强度分别提高了 17.39% 和 19.9%, 而质量减轻了 12.57%. Zheng 等^[6]建立了大型加工中心的工作台有限元模型, 基于灵敏度分析和拓扑优化对工作台结构进行改进, 大幅提高工作台动静态性能. 上述研究中通常只对机床的单个部件进行分析, 忽略了部件之间的相互作用. 这种单一部件的优化可能无法充分考虑整体性能的提升.

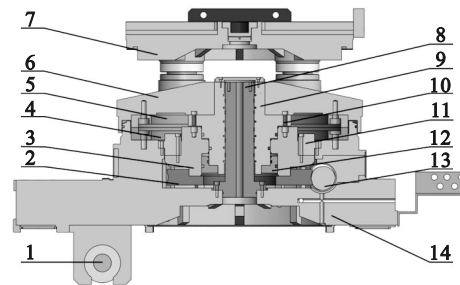
在机床多部件的结构优化方面, 郭垒等^[7]通过灵敏度分析的方法对一种机床的立柱、立滑板做了轻量化设计, 在保证刚度的前提下, 质量降低了 6.9%. 刘成颖等^[8]利用有限元法对机床整机进行动态分析, 结果表明立柱为影响整机动态性能的关键结构件. 然后对立柱进行拓扑优化, 结果表明该结构设计方法有效地改善了整机的动态性能. 姜衡等^[9]用基于响应面模型和灵敏度分析的方法, 对加工中心进行高刚度轻量化设计, 实现了整机层面上设计参数的动态优化. Wu 等^[10]提出了一种改进的机床概念设计两级优化方法. 实例表明该方法可以确定所有结构部件的主要尺寸, 从而在保持足够刚度的同时最大限度地减少机床的质量. 上述研究为机床优化提供了新的思路, 然而传统优化方法仅关注结构厚度尺寸与性能之间的关系, 而忽略了其他尺寸对性能的影响; 此外, 在实际制造和加工过程中, 许多随机因素会导致机床参数具有一定的随机不确定性, 传统的机床参数优化将这些参数视为确定值, 而忽略了不确定性的影响^[11], 因此很难为机床提供全面的设计策略.

本文提出了一种考虑机床参数不确定性的优化方法. 在基于参数化模型的机床回转工作台优化方法中, 除了考虑回转工作台内部及与其他部件装配关系的不变性, 还引入了随机不确定性

因素. 通过灵敏度分析方法, 确定对回转工作台性能影响较大的尺寸参数, 并对这些参数进行优化. 为了克服传统基于梯度的优化方法容易收敛于局部最优的弊端, 本文引入不依赖目标函数梯度的元启发式优化方法, 以实现回转工作台的优化设计.

1 回转工作台力学性能模型

回转工作台由工作台板、回转座、鼠牙盘和滑座这 4 个主要部件组成, 具体结构如图 1 所示. 利用参数化建模技术建立了回转工作台的力学性能模型, 研究转台结构参数对系统变形的影响.



1—丝杆; 2—蜗轮; 3—油缸体; 4—下牙盘; 5—上牙盘; 6—回转座; 7—工作台板; 8—分油轴; 9—活塞; 10—销; 11—转台轴承; 12—油缸端盖; 13—蜗杆; 14—滑座.

图 1 牙盘式回转工作台结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tooth disc-type rotary table structure

1.1 回转工作台简化参数化模型

在切削加工过程中, 工作台处于夹紧状态, 工作台板、回转座、上下牙盘与滑座形成一个整体. 为了提高有限元分析的计算精度和效率, 对回转工作台的一些结构进行了简化, 例如倒角、螺栓、键槽和油路等, 这些结构对回转工作台的静力分析影响较小. 同时考虑到回转工作台内部的传动部件均为标准件, 不便进行优化, 在不影响系统装配关系的前提下, 对工作台板、回转座、鼠牙盘、滑座进行参数化建模.

1.2 边界条件

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.

接触设置方面, 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.

赋予相关材料参数, 设置迭代过程的收敛容差, 对回转工作台整体结构进行静力学分析.

1.3 网格无关化验证

网格无关化验证是确保有限元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.

回转工作台力学性能分析过程如图 2 所示.

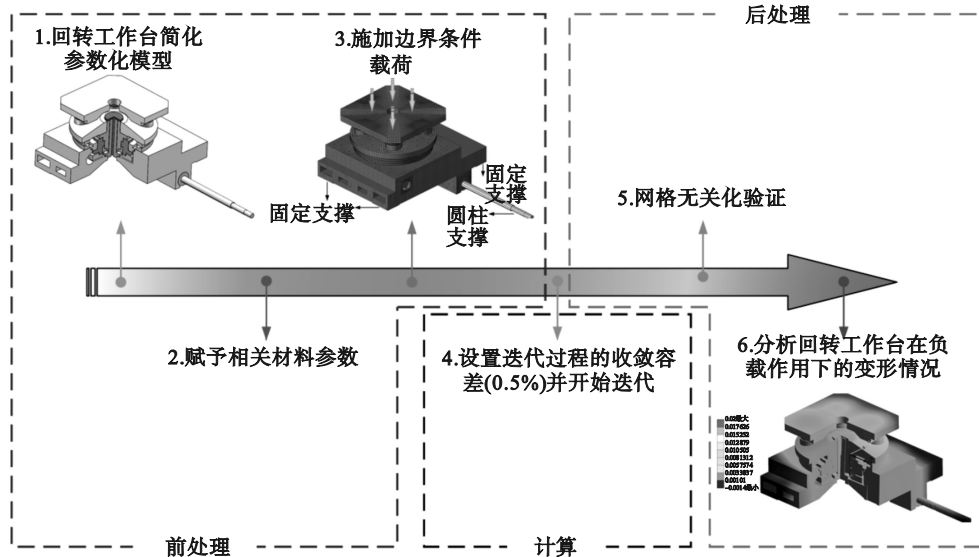


图 2 回转工作台力学性能分析过程

Fig. 2 Analysis process of the mechanical performances for the rotary table

2 可靠性优化设计

在工程实际中,材料特性的差异、制造误差和测量误差等因素会导致产品的实际结构参数存在一定程度的随机不确定性.这种不确定性将严重影响回转工作台的精度和可靠性.因此,本文提出了一种基于自适应 Kriging 代理模型和元启发式优化的可靠性优化设计方法,以获得回转工作台结构参数的最优配置.

2.1 可靠性评估

在不影响回转工作台整体装配关系的前提下,对工作台板、回转座、鼠牙盘、滑座的结构参数进行灵敏度分析,提取对回转工作台整体质量与变形影响较大的参数视作分析过程中的随机变量.系统随机变量为

$$\mathbf{X}=[A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots, C_1, C_2, \dots, D_1, D_2, \dots]^T.$$

其中: A 为鼠牙盘的结构参数; B 为回转座的结构参数; C 为工作台板的结构参数; D 为滑座的结构参数.

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

$$g(\mathbf{X})=L^*-L(\mathbf{X}). \quad (1)$$

式中: $g(\mathbf{X})$ 为回转工作台极限状态函数; L^* 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 0.02 mm, 本文将其作为回转工作台系统允许的最大 Z 向变形; $L(\mathbf{X})$ 是系统 Z 向变形响应值.

函数 $g(\mathbf{X})>0$ 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.

$$P_f = \int_{g(\mathbf{X})>0} \dots \int f_{\mathbf{X}}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (2)$$

对于上述有限元模型计算出的动态参数数据如采用 Monte Carlo 方法^[12]计算可靠度,计算量很大,为兼顾计算精度及计算效率,本文采用自适应 Kriging^[13]代理模型来代替耗时的有限元模型.

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^[14].该模型具有全局近似和局部随机误差相结合的特点,可以表示为

$$g_{k_i}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{X}) \beta_i + z(\mathbf{X}), n = 1, 2. \quad (3)$$

式中: $g_{k_i}(\mathbf{X})$ 为回转工作台系统变形 L 的 Kriging 模型; $g_{k_i}(\mathbf{X})$ 为回转工作台系统质量 M 的 Kriging 模型; $f(\mathbf{X})$ 是随机向量 \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 表示基函数的个数; $z(\mathbf{X})$ 为一随机过程,其协方

差矩阵可表示为

$$\text{cov}[z(\mathbf{x}^{(i)}), z(\mathbf{x}^{(j)})] = \sigma^2 [R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})]. \quad (4)$$

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

$$R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \exp\left(-\sum_{k=1}^m \theta_k |x_k^{(i)} - x_k^{(j)}|^2\right). \quad (5)$$

回转工作台系统变形 L 与系统质量 M 的 Kriging 代理模型估计值可以表示为

$$g_{k_n}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x})\hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{g} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}), n = 1, 2. \quad (6)$$

式中: $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 为 $\boldsymbol{\beta}$ 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; $\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 为训练样本点和预测点之间的相关函数向量; $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 和方差估计值 $\hat{\sigma}^2$ 分别为

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{g}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = (\mathbf{g} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F}\hat{\boldsymbol{\beta}}) / m. \quad (8)$$

相关参数 θ 可以通过求极大似然估计的最大值得到, 即

$$\max F(\theta) = -\frac{m \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|}{2}. \quad (9)$$

通过上述分析, 根据输入的样本数据与有限元输出的响应值可以分别构建回转工作台系统变形 L 与系统质量 M 的 Kriging 代理模型.

为了减少模型调用次数, 提升可靠性分析效率, 获得更为准确的预测结果, 本文采用自适应 Kriging 代理模型结合 Monte Carlo 数值模拟法进行可靠性分析. 具体思路为

1) 根据输入变量的联合概率密度函数, 使用 Monte Carlo 数值模拟法生成一组输入变量的随机样本, 构建 MCS 样本池.

2) 利用学习函数对 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.

3) 用步骤 2) 挑出的数据点更新 Kriging 模型, 提高模型的拟合精度.

4) 不断重复步骤 2), 3), 直到 Kriging 模型满足一定的置信水平, 并得到较为准确的系统可靠性评估结果.

基于自适应 Kriging 代理模型拟合方法的可靠性分析流程如图 3 所示.

2.2 优化策略

本研究构建了一种综合考虑“质量-刚度-可靠性”的可靠性优化模型, 在保证回转工作台刚度和可靠度的同时, 尽可能地减少质量. 所提出

的可靠性优化问题可以表示为

$$\left. \begin{aligned} &\text{find: } \mathbf{X}. \\ &\text{min: } M(\mathbf{X}). \\ &\text{subject: } R_i(\mathbf{X}) \leq 0, \\ &\quad G_i(\mathbf{X}) \leq 0, \\ &\quad \mathbf{X}^L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}^U. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{X} = [A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots, C_1, C_2, \dots, D_1, D_2, \dots]^T$ 是设计变量; $M(\mathbf{X})$ 是目标函数, 表示回转工作台整体质量; $R_i(\mathbf{X}) \leq 0$ 和 $G_i(\mathbf{X}) \leq 0$ 分别为可靠性约束和确定性约束; \mathbf{X}^L 和 \mathbf{X}^U 为设计变量的下限和上限.

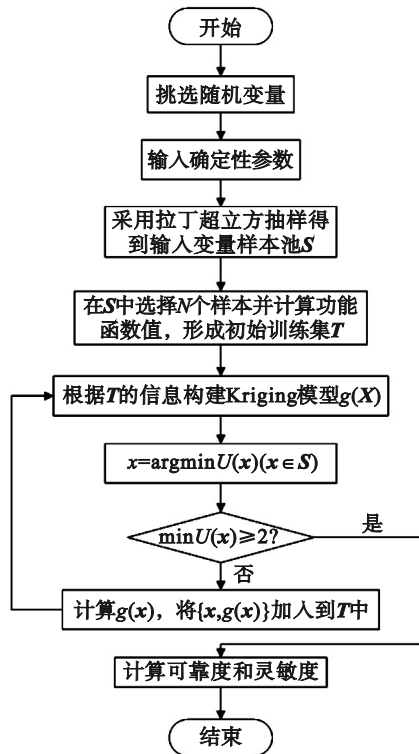


图 3 基于自适应 Kriging 代理模型的可靠性分析流程
Fig. 3 Reliability analysis flowchart based on the adaptive Kriging surrogate model

传统的基于梯度的优化方法旨在沿着梯度方向搜索最优解, 这通常会导致算法收敛于局部最优. 因此, 本文引入元启发式优化算法来解决所提出的可靠性优化问题.

2.3 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法 (WOA)^[15] 是一种新型群体智能优化搜索方法, 源于对自然界中鲸鱼群体狩猎行为的模拟, 其捕食行为主要分为 3 类: 包围猎物、发泡网攻击、搜索捕食. 鲸鱼群捕食猎物过程中, 当某条鲸鱼先发现猎物时, 其他鲸鱼会游向这条发现猎物的鲸鱼来争抢猎物. 这个捕食过程可以应用到 WOA 求解过程中, 即一个解用一个鲸鱼个体表示. WOA 搜索问题解的过程可以看作是若干个鲸鱼个体不断更新位置, 直至搜索到

满意的解为止。

3 算例分析

本算例选用牙盘式回转工作台进行分析研究,其主要结构与材料属性如表 1 所示。

3.1 仿真结果分析

根据力学性能分析模型对回转工作台进行力学性能分析得出,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.为了展现本文提出的可靠性优化设计的优势,对回转工作台系统在该风险载荷下进行优化设计,获得回转工作台结构参数的最优配置。

3.2 优化参数提取

回转工作台中有许多部位与其余零部件之间形成装配关系,这些结构不宜作改动.在不影响结构装配关系的前提下,对工作台板、回转座、鼠牙

盘、滑座的 67 个尺寸进行参数化建模,分析了各尺寸参数对系统质量与变形的灵敏度,如图 4 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 钢	13.7
活塞	45 钢	39
油缸体	45 钢	62
油缸端盖	45 钢	5.6
蜗轮	ZQSn10-1	29.6
蜗杆	38CrMoAlA	9.2
转台轴承	GCR15SiMn	25

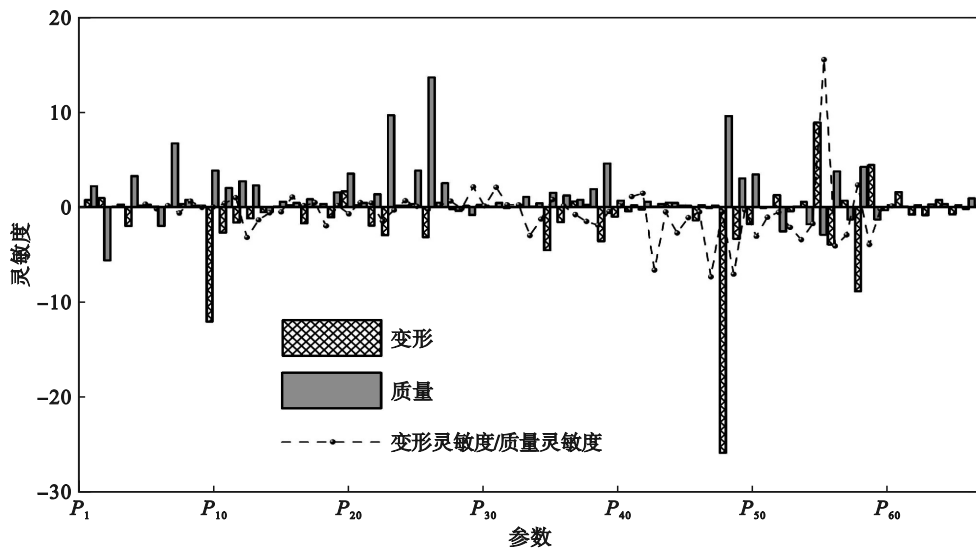


图 4 回转工作台尺寸参数的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of the dimensional parameters for the rotary table

综合考虑尺寸参数对系统变形、质量的灵敏度,以及系统质量对系统变形的灵敏度,从回转工作台 67 个尺寸参数中,选取 15 个作为优化过程的设计变量,如图 5 所示,设计变量的初值如表 2 所示。

3.3 优化目标函数及边界约束

3.3.1 约束条件

为了满足装配需求,鼠牙盘外径必须小于回转座的外径.因此,约束函数 $G_1(X)$ 可以表示为

$$G_1(X) = \frac{A_1}{2} + A_2 - 291. \quad (11)$$

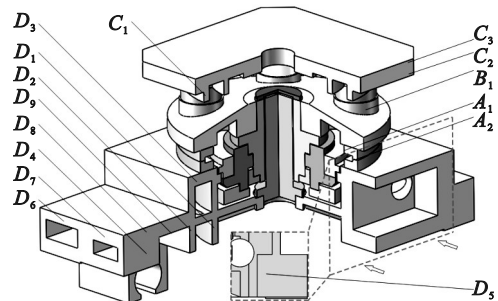


图 5 牙盘式回转工作台的设计变量

Fig. 5 Design variables of the tooth disc-type rotary table

表2 设计变量的初值及分布细节

Table 2 Initial values and distribution details of the design variables

参数	分布类型	初始值/mm	变异系数
A_1	正态分布	490	0.02
A_2	正态分布	20	0.02
B_1	正态分布	130	0.02
C_1	正态分布	22.5	0.02
C_2	正态分布	14	0.02
C_3	正态分布	36	0.02
D_1	正态分布	103	0.02
D_2	正态分布	25	0.02
D_3	正态分布	35.5	0.02
D_4	正态分布	128	0.02
D_5	正态分布	70	0.02
D_6	正态分布	30	0.02
D_7	正态分布	45	0.02
D_8	正态分布	30	0.02
D_9	正态分布	125	0.02

优化结果在极限状态下的系统变形应小于 L^* , 因此, 约束函数 $G_2(\mathbf{X})$ 可以表示为

$$G_2(\mathbf{X}) = L(\mathbf{X}) - L^* \quad (12)$$

其中 $L(\mathbf{X})$ 由回转工作台力学性能模型预测.

优化结果需满足回转工作台变形可靠性的需求, 将回转工作台的可靠性优化目标 R_i 设置为 90%. 因此, 可靠性约束函数 $R(\mathbf{X})$ 可以表示为

$$R(\mathbf{X}) = R_i - R_i(g(\mathbf{X}) > 0) \quad (13)$$

3.3.2 边界条件

转台结构、装配工艺等都会对设计变量有一定的限制. 因此, 应将设计变量限制在允许值内, 以使结果符合工程应用^[16]. 设计变量的优化区间如表3所示. 在可靠性评估过程中, 将随机变量设置为正态分布, 变异系数为0.02.

3.3.3 目标函数

在本文中, 将约束集归一化为惩罚函数, 以精确减少候选解的约束违反^[17-18]. 对于回转工作台的可靠性优化方法, 目标函数可以表示为

$$\min M_1(\mathbf{X}) = M(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^2 [p_i |G_i(\mathbf{X})|] + p_r |R(\mathbf{X})| \quad (14)$$

其中, p_i 和 p_r 分别为确定性约束和可靠性约束的惩罚因子.

为了展现本文提出可靠性优化方法的优势, 采用确定性优化作为对比, 回转工作台确定性优

化的目标函数可以表示为

$$\min M_2(\mathbf{X}) = M(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^2 [p_i |G_i(\mathbf{X})|] \quad (15)$$

表3 设计变量的优化区间

Table 3 Optimization intervals of design variables

参数	区间/mm	参数	区间/mm
A_1	460~570	D_3	20~50
A_2	5~30	D_4	115~145
B_1	70~150	D_5	60~80
C_1	10~80	D_6	20~40
C_2	5~32	D_7	35~55
C_3	5~50	D_8	15~45
D_1	80~115	D_9	80~130
D_2	20~40		

3.4 可靠性优化

3.4.1 Kriging模型拟合方法验证

Kriging 代理模型的准确性对于可靠性评估及可靠性优化至关重要. 采用拉丁超立方抽样法, 随机抽取 150 组尺寸参数数据作为输入样本, 抽取的样本数据服从均匀分布, 上下边界如表3所示. 每组分别进行有限元设置与求解, 得到的系统最大 Z 向变形值和系统总质量为输出变量, 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 代理模型进行更新, 直到满足自适应学习过程的收敛条件.

另随机抽取 100 组数据作为验证集, 所得预测结果对比如图6和图7所示, 相对误差均小于 1%, 表明 Kriging 模型具有很高的拟合精度.

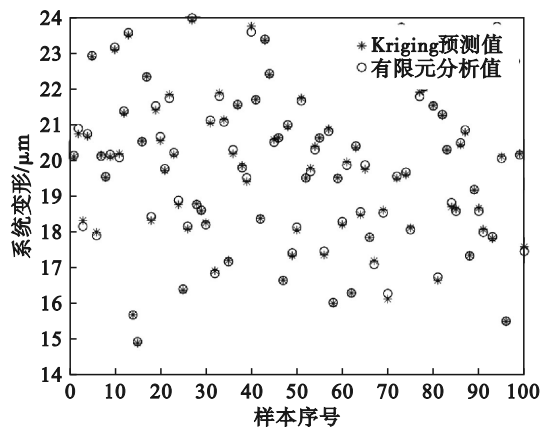


图6 系统变形预测结果对比图

Fig. 6 Comparison chart of the system deformation prediction results

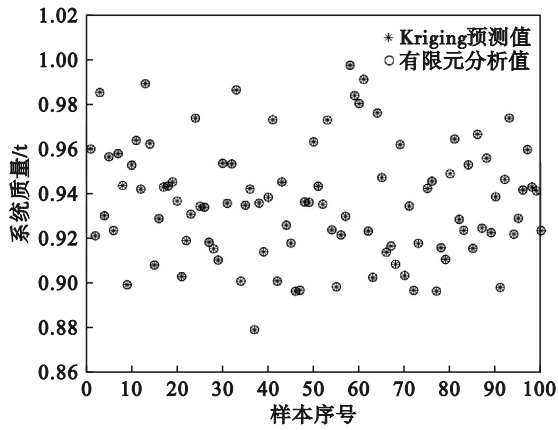


图 7 系统质量预测结果对比图

Fig. 7 Comparison chart of the system quality prediction results

3. 4. 2 可靠性优化结果对比

根据引入的可靠性优化方法,对本文提出的优化问题进行计算.最大迭代步数设定为 50,将优化后的参数及结果进行对比,结果如表 4 所示.同时将优化后的参数用有限元分析验证,系统变形云图如图 8 所示,优化结果误差均小于 1%,在可接受的范围.将 3 种结构的系统变形概率密度分

布及累积分布进行对比,如图 9 和图 10 所示.

表 4 优化结果对比

Table 4 Comparison of the optimization results

变量	无优化	确定性优化	可靠性优化
A_1/mm	490	537.922	538.236
A_2/mm	20	18.000	18.191
B_1/mm	130	138.480	140.000
C_1/mm	22.5	48.275	68.082
C_2/mm	14	24.961	25.000
C_3/mm	36	15.968	15.636
D_1/mm	103	80.000	80.000
D_2/mm	25	37.538	27.536
D_3/mm	35.5	20.000	21.276
D_4/mm	128	130.932	148.201
D_5/mm	70	60.750	60.152
D_6/mm	30	20.143	20.001
D_7/mm	45	35.486	35.995
D_8/mm	30	24.068	18.437
D_9/mm	125	103.489	123.492
变形/mm	0.020	0.020	0.020
质量/t	0.960	0.878	0.881
可靠性/%	49.11	60.95	90.35

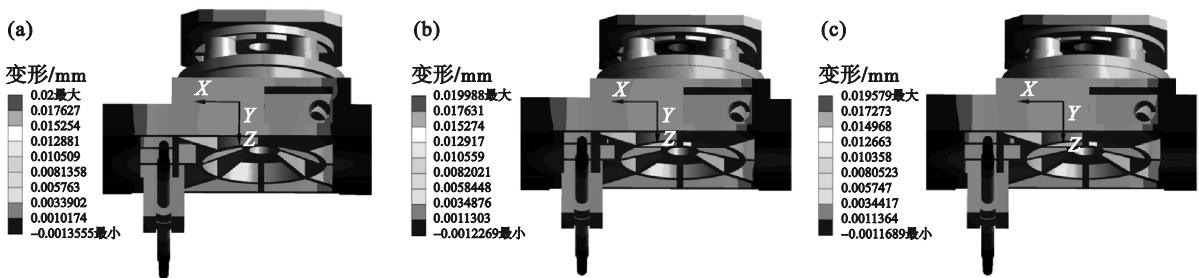


图 8 优化结果验证

Fig. 8 Optimization result verification

(a)一无优化; (b)一确定性优化; (c)一可靠性优化.

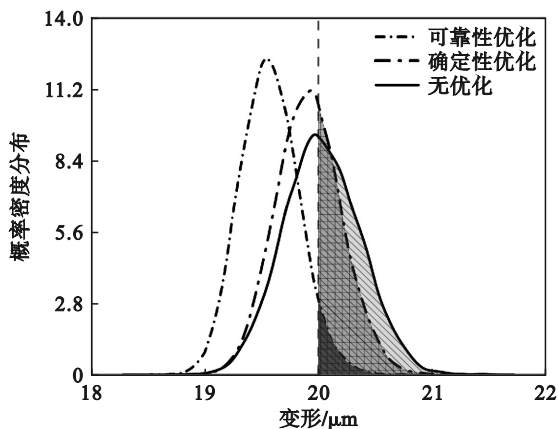


图 9 参数优化后系统变形概率密度图

Fig. 9 System deformation probability density diagram after parameter optimization

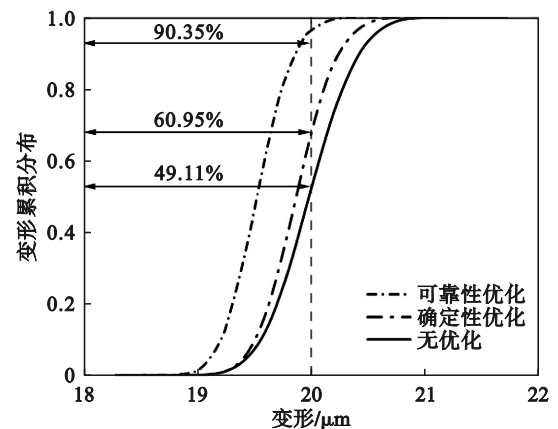


图 10 参数优化后系统变形累积分布图

Fig. 10 Cumulative distribution diagram of the system deformation after parameter optimization

由表 4 可知,对回转工作台参数进行确定性优化后,系统质量从 0.960 t 下降至 0.878 t,系统的变形可靠性从优化前的 49.11% 增加至 60.95%,但仍无法满足系统变形的可靠性约束条件.然而,对回转工作台参数进行可靠性优化后,系统质量由 0.960 t 下降至 0.881 t,降低了 8.2%,系统变形可靠性可以达到 90.35%,满足要求,因此可以证明本文方法的有效性.

由图 9 和图 10 可知,可靠性优化后的回转工作台相较于确定性优化和无优化的回转工作台来说,系统变形分布区间降低且区间缩小,因此,本文提出的回转工作台优化设计框架可以指导回转工作台变形可靠性的优化.

4 结 论

1) 结合 Kriging 代理模型和 WOA 智能优化,提出了回转工作台的确定性优化和可靠性优化.此外,训练的 Kriging 代理模型与基于有限元的模型之间相对误差小于 1%,这表明 Kriging 模型具有良好的精度.

2) 对优化前后回转工作台的性能进行了定量比较.可靠性优化方法的系统可靠性可以达到 90.35%,而确定性优化和原始结构的系统变形可靠性不能达到相同的目标,证明所提出的可靠性优化方法的鲁棒性和有效性.

3) 确定性优化和可靠性优化的回转工作台总质量分别降低约 8.6% 和 8.2%.这表明可靠性优化方法考虑了转台结构参数的不确定性.

参考文献:

- [1] Kroll L, Blau P, Wabner M, et al. Lightweight components for energy-efficient machine tools [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4(2): 148-160.
- [2] 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.
- [3] Deng H X, Zhao L, Ma J F, et al. Structural bionic 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.
- [4] Gao Q D, Zhang F, Mao Y Z, et al. Application of honeycomb structure in machine tool table [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1377: 1233-1237.
- [5] Zhao H W, Cheng L Y, Xiao P X, et al. Layout design of stiffened plates for large-scale box structure under moving loads based on topology optimization [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-11.
- [6] Zheng B, Ying G F, Huang H, et al. Optimization design for fixed table of gantry machining center based on sensitivity and topology analyses [J]. *Journal of Donghua University*, 2013, 30(4): 263-268.
- [7] 郭垒,张辉,叶佩青,等.基于灵敏度分析的机床轻量化设计[J].清华大学学报(自然科学版),2011,51(6):846-850.
(Guo Lei, Zhang Hui, Ye Pei-qing, et al. Lightweight design of machine tools based on sensitivity analysis [J]. *Journal of Tsinghua University (Natural Science)*, 2011, 51(6): 846-850.)
- [8] 刘成颖,谭锋,王立平,等.面向机床整机动态性能的立柱结构优化设计研究[J].机械工程学报,2016,52(3):161-168.
(Liu Cheng-ying, Tan Feng, Wang Li-ping, et al. Research on optimal design of column structure for the dynamic performance of machine tools [J]. *Transactions of the Chinese Society of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 161-168.)
- [9] 姜衡,管贻生,邱志成,等.基于响应面法的立式加工中心动静态多目标优化[J].机械工程学报,2011,47(11):125-133.
(Jiang Heng, Guan Yi-sheng, Qiu Zhi-cheng, et al. Dynamic and static multi-objective optimization of vertical machining center based on response surface method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Mechanical Engineering*, 2011, 47(11): 125-133.)
- [10] Wu B C, Young G S, Huang T Y. Application of a two-level optimization process to conceptual structural design of a machine tool [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(6): 783-794.
- [11] Jiang Z Y, Huang X Z, Ding P F, et al. Reliability-based design optimization of the spiral water jacket for motorized spindle [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 51: 103665.
- [12] 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.
- [13] Ma M F, Liu H Q, Wu X J, et al. Global reliability sensitivity analysis of cradle-type double rotary table [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, 239(5): 1492-1505.
- [14] 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.
- [15] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51-67.
- [16] Ohadi S, Jafari-Asl J. Multi-objective reliability-based optimization for design of trapezoidal labyrinth weirs [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 77: 101787.
- [17] Verma S K, Tiwari R. Robust optimum design of tapered roller bearings based on maximization of fatigue life using evolutionary algorithm [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 152: 103894.
- [18] Jafari-Asl J, Seghier M E A B, Ohadi S, et al. Efficient method using whale optimization algorithm for reliability-based design optimization of labyrinth spillway [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 101: 107036.