DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2024.05.019 张浩,李振澳,董晓威,等. 基于自适应 Kriging 模型的双螺旋轴可靠性分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5); 207-215.

基于自适应 Kriging 模型的双螺旋轴可靠性分析

张浩, 李振澳, 董晓威, 李瑞祥, 侯光旭, 衣淑娟

黑龙江八一农垦大学 工程学院,黑龙江 大庆 163319

摘要: 双螺旋轴是高速水稻插秧机的关键部分,其回转槽面在强轴向力作用下容易破坏失效,因此对双螺旋轴进 行可靠性分析十分重要.针对传统方法获得其可靠度耗资大、时间长的问题,采用自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析方法(AK-MCS)对双螺旋轴进行可靠性分析,以减少计算成本、提高计算效率.根据双螺 旋轴的工况条件,考虑材料密度、工作载荷、工作温度3个参数对其所受挤压应力的影响,进行可靠性分析.分析 结果表明:在许用应力值为 613.21 MPa 的条件下,计算得出双螺旋轴的可靠度为 0.998 6. 与单一的 Monte Carlo 模拟法进行对比,本文提出的评估方法在仿真效率上有明显优势,为双螺旋轴可靠性分析提供了一种思路.

关 键 词: 自适应 Kriging 模型; Monte Carlo 模拟; 双螺旋轴;
 可靠性分析
 中图分类号: TB114.3; S223.91
 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)05-0207-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Reliability Analysis of Double Helix Shaft with Adaptive Kriging Model

ZHANG Hao, LI Zhenao, DONG Xiaowei, LI Ruixiang, Hou Guangxu, YI Shujuan

School of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing Heilongjiang 163319, China

Abstract: Double helix shaft is the key part of high-speed rice transplanter. The rotary groove surface of double helix shaft is easy to fail under the action of strong axial force. Therefore, it is necessary to analyze the reliability of double helix shaft. To solve the problem of high cost and long time in obtaining its reliability by traditional methods, this paper analyzes the reliability of double helix shaft by adaptive Kriging model and Monte Carlo simulation (AK-MCS) to reduce the calculation cost and improve the calculation efficiency. This paper expounds the process of reliability analysis of double helix shaft based on AK-MCS

收稿日期: 2023-12-01

基金项目:黑龙江省博士后面上资助项目(LBH-Z20203);国家重点研发计划项目(2023YFD2301604-2);中央引导地方科技发展专项 (ZY20B05);黑龙江八一农垦大学学成人才科研启动计划项目(XDB202002);黑龙江八一农垦大学"三纵"基础培育项目 (ZRCPY202104).

作者简介:张浩,硕士研究生,主要从事复杂结构/机构可靠性设计、水田生产全程机械化技术与装备研究.

通信作者:董晓威,教授,硕士研究生导师.

208

method. According to the working conditions of the double helix shaft, the reliability analysis was carried out by considering the influence of the three parameters of material density, working load and working temperature on the extrusion stress. The analysis results show that the reliability of the double helix shaft is 0.998 6 under the condition that the allowable stress value is 613.21 MPa. Compared with the Monte Carlo simulation method, the evaluation method proposed in this paper has obvious advantages in simulation efficiency, which provides a way of thinking for the reliability analysis of double helix shaft. Key words: adaptive Kriging model; Monte Carlo simulation; double helix shaft; reliability analysis

近年来,水稻插秧机在自动化、高效率、多功能和智能化等方面不断发展[1-2],高速旋转式水稻插秧机 秧箱的平均冲击载荷是曲柄摇杆式高速水稻插秧机的7倍,双螺旋轴会因受到较大的载荷而失效^[3],直接 影响插秧机移箱机构的稳定性、安全性和横向送秧的均匀性.因此,有必要对高速水稻插秧机双螺旋轴进 行可靠性分析.

为提高双螺旋轴的稳定性,相关学者已开展大量研究工作.杨文珍等[4]通过优化双螺旋轴回转曲线以 减少滑块对回转槽面的冲击,并通过有限元模拟验证所提出方法的合理性;赵匀等^[5]优化螺旋轴的曲线并 在双螺旋轴的两端施加缓冲弹簧装置以减少滑块对双螺旋轴两端滑道的作用力; 蒲明辉等[6]通过优化双螺 旋轴回转曲线以减少滑块对螺旋轴的作用力;褚婷婷等^[7]用 Kriging 模型建立了双螺旋轴结构参数与振荡 频率之间的关系,通过多目标分析优化了双螺旋轴的设计参数.以上研究表明,双螺旋轴主要失效部位为 回转槽面,即回转槽面受到滑块的较大冲击而破坏.对双螺旋轴进行可靠性分析,关键在于建立影响参数 与回转槽面失效形式之间的非线性关系,因此选择高效准确的可靠性分析方法[8-9]尤为重要.

采用传统方法进行双螺旋轴可靠性分析时,通常在试验机上对双螺旋轴进行直接破坏,并重复成百 上千次,需要消耗大量的时间与经费.基于概率理论的 Monte Carlo 模拟法(MCS)^[10-11]常用于可靠性分 析中,虽然精度较高,但是需要大量样本、耗时长,且对于高非线性的物理模型效果不理想.为此,工程 人员将代理模型法[12-13]引入到工程可靠性设计中,代理模型法仅需少量样本便能得到精确的可靠度.近 年来,自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析方法(AK-MCS)^[14] 被广泛应用到可靠性 分析中. 冯吉路等^[15]将AK-MCS法应用到主轴系统振动可靠性分析中,减少了97.2%的有限元分析时 间;罗文俊等^[16]将改进AK-MCS法应用到船舶板架极限强度可靠性分析中,减少了38%的有限元模型 调用次数:李娜等^[17]将AK-MCS法应用到地下管线抗震可靠性分析中,分析时间仅为MCS法的2%; 赵心怡等^[18]将AK-MCS法应用到角接触球轴承刚度的可靠性分析中,物理模型调用次数仅为MCS法 的 0.048%; 李正良等^[19]将 AK-MCS 法应用到直立锁缝屋面系统抗风揭可靠性分析中, 计算成本为 MCS 法的 25.1%; 刘玉敏等^[20]将 AK-MCS 法应用到新能源电动汽车转向驱动桥空心半轴可靠性分析 中,验证了AK-MCS法在效率和精度两方面均优于MCS法.以上研究中,AK-MCS法被应用到工程可 靠性分析中,在满足精度的同时,计算时间相比 MCS 法减少一半以上,验证了 AK-MCS 法在工程结构 可靠性分析中的高效性.本文旨在寻求进行双螺旋轴可靠性分析的高效准确方法,因此,AK-MCS法对 双螺旋轴可靠性分析具有实用价值.

本文分析了双螺旋轴所受载荷情况,介绍了自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析 方法以及实现双螺旋轴可靠性分析的流程,建立了双螺旋轴有限元分析模型,考虑材料密度、工作载荷、 工作温度3个参数对双螺旋轴回转槽面最大挤压应力的影响,并对其进行可靠性分析.最后与 MCS 可靠 性分析方法进行对比,验证了本文所采用方法的高效性与准确性.

双螺旋轴响应分析 1

移箱机构(图1)由双螺旋轴、滑块和轴套组成,是高速水稻插秧机的重要组成部分,工作原理是来自 动力机构的转矩传送给双螺旋轴,双螺旋轴带动滑块和轴套左右移动,实现秧箱秧盘的左右移动,从而使 分插机构的秧爪能够依次、均匀地在秧箱工作幅宽内完成取秧^[21].移箱机构运动分两种,第一种为平动阶 段,移箱机构水平移动推送秧箱和秧盘;第二种为急回阶段,移箱机构推送秧箱和秧盘换向.由于滑块在



1. 双螺旋轴; 2. 滑块; 3. 轴套.
 图 1 移箱机构

如图 2 所示, 在平动阶段, 移箱机构的载荷主要 来自秧箱与底盘的摩擦力 F_x , 滑块与滑道之间的摩 擦力 F_f 忽略不计, φ 为滑块与滑道之间的摩擦角. 设 秧箱与底盘的摩擦力 $F_x = \mu mg$, 所以在平动阶段, 螺旋槽所受到的正压力 F_{N1} 为:

 $F_{N1} = F_x \cos \gamma = \mu m g \cos \gamma$ (1) 式中: μ 为秧箱和秧盘与机架的摩擦系数; m 为秧箱 和秧盘的总质量; γ 为双螺旋轴的螺旋升角.

在急回阶段,螺旋槽所受到的摩擦力忽略不计, 仅受正压力 F_{N2} 为:

$$F_{N2} = \mu m g \tag{2}$$

式(1) 与式(2) 中, F_{N1} 与 F_{N2} 为 F_N 在不同阶段的表现形式.



温度也会影响双螺旋轴所受挤压应力的大小,具体数值受到多种因素的影响.在长时间工作后,移箱轴 部分的温度会上升,可达到 50 ℃ 左右.因此,双螺旋轴工作时,挤压应力会受到温度和载荷的双重影响.

2 双螺旋轴可靠性分析方法

基于自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析方法是在建立 Kriging 模型的基础上,通过学 习函数选取对失效面贡献最大的点,更新 Kriging 模型,最后通过 Monte Carlo 模拟法完成可靠性分析.

2.1 Kriging 基础理论

Kriging 模型包括回归函数和随机分量,可用 $g_K(\mathbf{x})$ 表示为:

$$g_{K}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} f_{i}(\boldsymbol{x})\beta_{i} + z(\boldsymbol{x})$$
(3)

式中: $f_i(\mathbf{x})$ 为回归函数的基函数; β_i 为回归函数的待定系数; $z(\mathbf{x})$ 为随机分量,定义在空间 $\mathbf{x}^{(i)}$ 和 $\mathbf{x}^{(j)}$ 的两点之间,具有均值为 0 和方差为 σ^2 的平稳高斯过程.其协方差矩阵的分量可以表示为:

 $\operatorname{Cov}[z(\boldsymbol{x}^{(i)}), z(\boldsymbol{x}^{(j)})] = \sigma^{2}[\boldsymbol{R}(\boldsymbol{x}^{(i)}, \boldsymbol{x}^{(j)})]$ (4)

式中: $\mathbf{R} = (\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}), i, j = 1, 2, \dots, m,$ 表示任意两个样本点的相关函数,它是相关矩阵**R**的分量, m 为训练样本的个数. $\mathbf{R} = (\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)})$ 有多种函数形式可以选择,高斯型相关函数的表达式为:

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{x}^{(i)}, \, \boldsymbol{x}^{(j)}) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{m} \theta_{k} \mid x_{k}^{(i)} - x_{k}^{(j)} \mid^{2}\right)$$
(5)



式中: θ_k 为未知的相关参数, $k = 1, 2, \dots, m$.

未知点 x 处的响应估计值为:

$$\int_{\mathcal{G}_K} (\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x}) \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}})$$
(6)

式中: $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ 为回归函数待定系数估计值向量; g 为训练样本数据的响应值构成的列向量; F 表示具有输入参数 样本的基函数 $m \times p$ 阶矩阵; r(x) 为训练样本点和预测点之间的相关函数向量,可以表示为:

$$^{T}(\mathbf{x}) = \{ \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(1)}), \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(2)}), \cdots, \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^{(m)}) \}$$
(7)

依据最小二乘理论,待定系数向量 β 和方差估计值 $\hat{\sigma}^2$ 分别为:

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

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

相关参数 $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$ 可以通过极大似然估计的最大值得到, 即:

$$\max F(\boldsymbol{\theta}) = -(m \ln(\sigma^2) + \ln |\boldsymbol{R}|)/2, \ \theta_k \ge 0 \qquad k = 1, 2, \cdots, m$$
(10)

求解的 θ 值构成的 Kriging 模型为拟合精度最优的代理模型^[21],用于表示输入变量与性能响应之间的函数关系.

2.2 U 学习函数及停止准则

U学习函数可以表示为:

$$U(\mathbf{x}) = \begin{vmatrix} \mu_{g_K}(\mathbf{x}) \\ \sigma_{g_K}(\mathbf{x}) \end{vmatrix}$$
(11)

式中: $\mu_{g_{\kappa}}(\mathbf{x})$ 和 $\sigma_{g_{\kappa}}(\mathbf{x})$ 分别为预测值的均值和标准差.对于样本点的U函数值,当 $g_{\kappa}(\mathbf{x})$ 相同时, $\sigma_{g_{\kappa}}(\mathbf{x})$ 越大,U函数值越小;当 $\sigma_{g_{\kappa}}(\mathbf{x})$ 相同时, $g_{\kappa}(\mathbf{x})$ 越接近0,U函数值越小.U函数值越小的样本所 对应的{ $\mathbf{x}, g_{\kappa}(\mathbf{x})$ }应加入到训练样本集中来更新Kriging模型.文献[14]认为,当U函数值大于等于2时 学习完成.

2.3 可靠性分析

根据自适应学习过程得到精确的 Kriging 模型,建立双螺旋轴可靠性分析的极限状态函数,其形式为: $y(x) = y_{allow} - g_K(x)$ (12) 式中: y_{allow} 为双螺旋轴回转槽面的许用应力值; $g_K(x)$ 为双螺旋轴回转槽面的应力响应值; x 为不确定输

人参数的随机输入变量. Monte Carlo 模拟法是依据大数定律,结合随机输入变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_1, \dots, x_n]^T$ 和通过 Kriging 模型 预测得到的结构响应 $g_K(\mathbf{x}) = [g_K(x_1), g_K(x_2), \dots, g_K(x_n)]^T$ 进行分析, *n* 为随机输入变量的数量.由 式(13) 可知, $I_F(\mathbf{x})$ 为失效域的指示函数,当 $y(\mathbf{x}) \le 0$ 时,指示函数的值取1,否则取0,故失效域为 $F = \{\mathbf{x}: y(\mathbf{x}) \le 0\}, g \ge 4$, $y(\mathbf{x}) > 0\}.$

$$I_F(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & y(\mathbf{x}) \leq 0\\ 0 & y(\mathbf{x}) > 0 \end{cases}$$
(13)

失效概率的估计值 \hat{P}_f 为落入失效域内的样本个数 N_F 与总样本个数N 的比值,引入式(13) 指示函数,则失效概率 \hat{P}_f 和可靠度 \hat{P}_r 分别为:

$$\hat{P}_{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} I_{F}(\mathbf{x}) = \frac{N_{F}}{N}$$
(14)

$$\hat{P}_r = 1 - \hat{P}_f \tag{15}$$

2.4 双螺旋轴可靠性分析步骤

步骤1 首先确定双螺旋轴的随机输入变量,根据数值特征(均值和标准差),采用拉丁超立方抽样 (LHS) 抽取 *m* 组输入样本建立 MCS 样本集 *N*_{MC}.

步骤2 建立双螺旋轴的有限元模型,从样本集 N_{MC} 中随机选取 n 组样本,结合有限元仿真获得结构 响应,建立初始训练样本集 T,根据式(3) - 式(10) 建立初始 Kriging 模型.

步骤3 将 MCS 样本集 N_{MC} 中的样本带入初始 Kriging 模型,并计算每个样本的U学习函数值U(**x**),将最小U(**x**)值的样本点作为下一个需要的样本点,更新 Kriging 模型.

步骤4 判断 Kriging 模型自适应性学习过程是否收敛.当 min $U(x) \ge 2$ 时,结束学习过程,执行步骤5. 若当 min U(x) < 2 时,计算 x" 的响应值 $g_{\kappa}(x^{*})$,并将 $\{x^{*}, g_{\kappa}(x^{*})\}$ 加入到训练样本集 T 中,作为训练样本更新 Kriging 模型.

$$x^{u} = \operatorname{argmin} U(\boldsymbol{x}) \tag{16}$$

步骤 5 利用当前 Kriging 模型计算样本池 N_{MC} 中所有 $\hat{g}_{\kappa}(\mathbf{x})$ 值,并计算失效概率 \hat{P}_{f} 和变异系数 Cov(\hat{P}_{f}). 失效概率由式(14)得到,并根据 Monte Carlo模拟法计算失效概率估计值的变异系数 Cov(\hat{P}_{f}), 其形式为:

$$\operatorname{Cov}(\hat{P}_{f}) \approx \sqrt{\frac{1 - \hat{P}_{f}}{(N - 1)\hat{P}_{f}}}$$
(17)

步骤 6 当 Cov(\hat{P}_f) < 5% 时,即认为 \hat{P}_f 对 P_f 估计是可以接受的,结束 AK-MCS 过程并得到 Kriging 模型. 通过该方法获得的概率估计值 \hat{P}_f 即作为失效概率 P_f ,若当 Cov(\hat{P}_f) \geq 5% 时,重新执行步骤 1,本次获得的样本数据仍可作为训练样本.

基于 AK-MCS 法进行双螺旋轴可靠性分析的整个流程如图 3 所示.



3 算例分析

3.1 确定性分析

以某型号高速水稻插秧机双螺旋轴为例,在 SolidWorks 软件中建立双螺旋轴的三维模型,如图 4 所示.



图 4 双螺旋轴三维模型

为减少计算时间,提高计算效率,仅建立滑块和双螺旋轴的三维模型,利用 ANSYS Workbench 划 分网格,并生成双螺旋轴的有限元分析模型,网格采用三维四面体网格,节点数为 142 665,单元数为 82 033,划分结果如图 5 所示.



图 5 双螺旋轴有限元模型

双螺旋轴材料^[22]选用 45 钢, 密度为 785 0 kg/m³,弹性模量为 2.1×10¹¹ Pa,泊松比为 0.269,热 膨胀系数为 1.2×10⁻⁵℃⁻¹.根据 实际工况,双螺旋轴在长时间工作 时,轴整体达到一定的温度,结合 ANSYS Workbench 热结构和静态 结构对其进行热结构耦合分析,设 置对应载荷和边界条件,执行确定 性分析获得其最大响应值.分析结 果如图 6 所示,双螺旋轴的最大应 力值点在螺旋轴回转部分槽面与



滑块接触处,最大应力值为 554.58 MPa.

3.2 双螺旋轴可靠性分析

由双螺旋轴响应分析可知,材料性能、载荷、螺旋轴工作温度影响了双螺旋轴回转槽面的最大挤压应 力,故选取材料密度、工作载荷以及工作温度作为双螺旋轴可靠性分析的随机输入变量,考虑材料密度、 来自滑块的压力和双螺旋轴的工作温度对双螺旋轴回转槽面最大挤压应力的影响,进行可靠性分析.随机 输入变量的分布形式以及数值特征如表1所示.

根据表1数据,采用拉丁超立方抽样(LHS)抽取1×10⁶组数据作为MCS样本池,并从中选择16组样本进行有限元仿真,获得双螺旋轴回转槽面挤压应力最大响应值,并建立训练样本集T.根据训练样本集

T 建立初始 Kriging 模型,回归模型为常数,相关模型为高斯型,经过主动学习过程后添加高效样本点 8 个,建立最终 Kriging 模型.

表 1	双螺旋轴模型中随机输入变量及概率分布参数

输入亦量	公布形式		标准关系
	为神形式	均直μ	你推差 0
密度, $ ho/(ext{kg} \cdot ext{m}^{-3})$	正态分布	7 850	157
载荷, F/N	正态分布	200	5
温度, T/℃	正态分布	48	1

根据建立的 Kriging 模型进行 10 000 次仿真,获得了双螺旋轴最大挤压应力响应的仿真历史图和频率 分布直方图,如图 7 和图 8 所示.双螺旋轴最大挤压应力服从均值为 554.61、标准差为 19.53 的正态分布. 根据 3σ 原则^[23]可知,双螺旋轴最大挤压应力的许用值 y_{atlow} = 613.21 MPa,建立极限状态函数为:

$$y(\mathbf{x}) = 613.\,21 - g_K(\mathbf{x}) \tag{19}$$

基于极限状态函数,结合 MCS 对不同样本规模下的双螺旋轴最大挤压应力进行可靠性分析.可靠性 分析结果如表 2 和图 9 所示.可以看出随着仿真次数的增加,双螺旋轴受到最大挤压应力时可靠度收敛为 一个定值 0.998 6,且此时的变异系数 Cov(\hat{P}_f)=3.61%,满足计算要求.所以将 0.998 6 作为双螺旋轴最 大挤压应力的可靠度.



表 2 不同仿真次数下的双螺旋轴可靠度

仿真次数	500	1 000	2 000	3 000	5 000	8 000	10 000	15 000	20 000
可靠度	0.998 0	0.999 0	0.998 5	0.998 7	0.998 8	0.998 5	0.998 6	0.998 6	0.998 6

3.3 结果分析

为验证基于 AK-MCS 的可靠性分析方法在进行双螺旋轴可靠性分析时的有效性,将本文方法与 MCS 法在仿真准确率和仿真效率上进行对比,2种方法(AK-MCS 和 MCS)分别进行 500 次、1 000 次、3 000 次、5 000 次模拟,实现双螺旋轴最大挤压应力可靠性分析.为真实反应对比结果,有限元仿真和数值仿真 均在相同计算环境中进行(CPU: Intel [©] Core[™] 12600KF,内存: 16GB).

在仿真准确率上(表 3),根据多次模拟可以得出结果,基于 AK-MCS 的可靠性分析方法获得双螺旋轴 最大挤压应力的可靠度与基于 MCS 法得到的结果基本一致,在 3×10³ 模拟水平上,相对准确率达到了 99.98%,因此基于 AK-MCS 可靠性分析方法具有较高的准确率. 在仿真效率上(表 4), MCS 法在 500 次水平上用时 7 550 min, 基于 AK-MCS 的可靠性方法得到可靠度用时 362.4 min,在所用时间上是 MCS 法的 4.8%.随着模拟次数的增加,AK-MCS 可靠性分析方法的效率明显提高,在模 拟次数为 5 000 时,AK-MCS 可靠性分 析方法的用时仅为 MCS 法的 0.5%,原 因在于 AK-MCS 可靠性分析方法仅需 要 24 次仿真(初始样本和高效样本的仿 真次数),且数值仿真时间远小于有限 元仿真.因此,AK-MCS 可靠性分析方 法更高效.



综上所述,基于AK-MCS可靠性分析方法在进行双螺旋轴可靠性分析时,能够快速计算出可靠度且具 有较高的精度,优势明显.

描书学校	山	相对准确率/	
	MCS	AK-MCS	
500	0.998 0	0.998 0	100
1 000	0.997 0	0.999 0	99.80
3 000	0.998 3	0.998 5	99.98
5 000	0.998 6	0.998 8	99.98

表 3 仿真准确率结果对比

表 4 仿真效率分析结果

	所用时	时间占比/	
侯拟仈奴 -	MCS	AK-MCS	- %
500	7 550	362.4	4.8
1 000	15 120	362.5	2.4
3 000	45 421	362.5	0.8
5 000	75 623	362.5	0.5

4 结论

本文采用自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析方法(AK-MCS)对双螺旋轴进行可 靠性分析,考虑材料密度、工作载荷、工作温度3个参数对双螺旋轴最大挤压应力的影响,计算获得可靠 度.得出以下主要结论:

1) 建立了双螺旋轴的有限元分析模型,通过热结构耦合分析得到了双螺旋轴的最大应力值为 554.58 MPa,位置在回转槽面.

2) 基于 AK-MCS 方法建立了双螺旋轴最大挤压应力极限状态函数,并完成可靠性分析,在许用抗压 强度为 613.21 MPa 条件下,计算出双螺旋轴的可靠度为 0.998 6.

3)将 MCS 法与自适应 Kriging 模型结合 Monte Carlo 模拟的可靠性分析方法在仿真效率上进行对比,本文采用的 AK-MCS 可靠性分析方法具有明显的优势.

参考文献:

- [1] 谢祖琪, 熊昌国, 姚金霞, 等. 水稻机械化栽插对水稻产量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 128-135.
- [2] 陈聪,曹光乔,张萌.中国水稻机插秧发展趋势预测与装备需求研究 [J].云南农业大学学报(自然科学),2015, 30(2):289-293.
- [3] 黄节泵.水稻插秧机核心工作部件的动力学分析与改进研究 [D].杭州:浙江理工大学,2011.
- [4] 杨文珍,赵匀,李革,等. 高速水稻插秧机移箱螺旋轴回转轨道优化设计 [J]. 农业机械学报,2003,34(6):167-168, 175.
- [5] 赵匀,黄节泵,张玮炜.旋转式水稻插秧机移箱机构耐磨损设计 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 58-62.
- [6] 蒲明辉, 宋金环, 卢煜海, 等. 水稻插秧机移箱机构中螺旋轴的分析与改进 [J]. 农机化研究, 2015, 37(11): 37-41.
- [7] 储婷婷,朱德泉,朱宏,等.基于近似模型的螺旋轴式移箱机构多学科设计优化 [J]. 安徽农业大学学报,2018, 45(6):1147-1153.
- [8] 杨林,党明,董成举,等. 农机装备可靠性现状分析及发展建议 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(2): 1-6.
- [9] 董晓威. 垂直螺旋式水稻侧深施肥机理与装置参数研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- [10] YUN W Y, LU Z Z, JIANG X, et al. AK-ARBIS: An Improved AK-MCS Based on the Adaptive Radial-Based Importance Sampling for Small Failure Probability [J]. Structural Safety, 2020, 82: 101891.
- [11] 古松,赵雷. 公路钢筋混凝土梁桥抗震可靠性分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(11): 145-150.
- [12] DONG X W, LI W K, ZHU C Y, et al. Dynamic Reliability Design of Multicomponent Structure with Improved Weighted Regression Distributed Collaborative Surrogate Model Method [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018; 1-16.
- [13] LU C, FEI C W, FENG Y W, et al. Probabilistic Analyses of Structural Dynamic Response with Modified Kriging-Based Moving Extremum Framework [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 125: 105398.
- [14] ECHARD B, GAYTON N, LEMAIRE M. AK-MCS: An Active Learning Reliability Method Combining Kriging and Monte Carlo Simulation [J]. Structural Safety, 2011, 33(2): 145-154.
- [15] 冯吉路, 孙志礼, 赵坚, 等. 基于 AK-MCS 法的主轴系统振动可靠性分析 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 135-140.
- [16] 罗文俊, 王德禹. 基于改进 AK-MCS 法的船舶板架极限强度可靠性分析 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(3): 123-128, 168.
- [17] 李娜, 侯本伟, 杜修力, 等. 基于主动学习 Kriging 模型的地下管线抗震可靠度分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(10): 112-121.
- [18] 赵心怡, 王先明, 张天霄. 基于 AK-MCS 法的角接触球轴承刚度的可靠性分析 [J/OL]. 轴承, (2023-11-07) [2023-12-01]. https://link.cnki.net/urlid/41.1148.TH.20231106.1623.002.
- [19] 李正良, 王成, 王涛, 等. 基于主动学习 Kriging 模型的直立锁缝屋面系统抗风揭可靠度分析 [J]. 工程力学, 2022, 39(10): 111-119.
- [20] 刘玉敏,谢启盛,承姿辛,等. 基于 AK-MCS 法的新能源电动汽车转向驱动桥空心半轴可靠度分析 [J]. 机械设计, 2023, 40(5): 27-35.
- [21] 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.
- [22] 高松林. 水稻植质钵育栽植机横向移箱轴组件性能研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2013.
- [23] 路成. 基于先进代理模型的复杂结构/机构可靠性设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2020.

责任编辑 汤振金

柳剑