文章编号: 1001-0920(2019)09-1929-08

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0353

面向复杂装备精密产品质量特性的 Kriging-RBDO可靠性优化设计

陈洪转1,万良琪1†,欧阳林寒1,李亚平2

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院,南京 211106; 2. 南京林业大学 经济与管理学院,南京 210037)

摘 要:不确定设计参数情形下的复杂装备柔顺机构精密产品质量特性波动与可靠性疲劳退化是精密微机电系统领域的基础性工程难题.针对这一基础性工程难题,提出一种面向复杂装备柔顺机构精密产品可靠性优化设计 模型.利用拉丁超立方试验设计(Latin hypercube design,LHD)构建试验设计组合方案,通过有限元数值模拟获取 各试验设计组合方案的质量特性值.据此,采用Kriging代理模型建立质量特性与不确定设计参数之间复杂非线 性函数关系模型.在此基础上,引入基于可靠性优化设计(Reliability-based design optimization,RBDO)策略,构建 面向复杂装备柔顺机构精密产品 Kriging-RBDO 可靠性优化设计模型.算例表明,所提出的方法在不确定设计参 数情形下的复杂装备柔顺机构精密产品早期质量设计方面具有良好的抗疲劳退化特性.

关键词:柔顺机构;可靠性优化设计;代理模型 中图分类号:TH112 文献标志码:A

Precision product of complex equipment quality characteristic reliabilitybased design optimization using Kriging model

CHEN Hong-zhuan¹, WAN Liang-qi^{1†}, OUYANG Lin-han¹, LI Ya-ping²

 College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
 College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Quality characteristic variation and reliability degradation in complex product of compliant mechanism caused by aleatory uncertainty is a basic engineering problem in micro electro mechanical systems (MEMS). In order to conquer this, we propose a novel reliability-based design optimization approach for the complex product of the compliant mechanism. The Latin hypercube design is adopted to experiment design. After collecting experimental data based on the finite element analysis, the Kriging surrogate model is introduced to establish the functional relationship between design variables and a response. Then, the reliability-based design optimization (RBDO) optimization strategy is employed to build the complex product of the compliant mechanism Kriging-RBDO hybrid reliability optimization model. The numerical results illustrate the excellent anti-jamming capability of the proposed approach.

Keywords: compliant mechanism; reliability-based design optimization (RBOO); surrogate model

0 引 言

柔顺机构是各种先进精密微机械复杂装备的重要组成单元,要求在微小空间内具有能量传递、运动转换和调节控制等功能,以实现规定的动作和精度. 柔顺机构依靠弹性变形来实现力、运动和能量的传递或转换^[1],具有无间隙、无磨损、无摩擦和无需润滑等优点,因此在微机电系统(Micro electro mechanical systems, MEMS)、航天航空、武器装备等尖端领域具有极大的应用潜力.柔顺机构可靠性设计对于保障 安全生产,推动产品结构优化和性能改进,提高其后 期开发的产品或系统运行可靠性、安全性和稳健性 具有重要意义.复杂装备柔顺机构精密产品在复杂 工况的实际服役过程中,由于加工容差扰动、循环载 荷、物理系数变异等不确定性因素对设计参数有影 响,往往导致其质量特性稳定性难于控制、可靠性难 于预计等基础工程难题,因此针对微机械快速发展的 新趋势,迫切需要探索解决这一难题的可靠性优化设 计方法.

收稿日期: 2018-03-24; 修回日期: 2018-06-05.

基金项目:国家自然科学基金项目(7181101006,71702072,71573115,71701098);教育部人文社科规划基金项目 (18YJA630008);江苏省自然科学基金项目(BK20170810,BK20160940);中央高校基本科研业务费专项 基金项目(NJ2018023).

[†]通讯作者. E-mail: wanliangqi@nuaa.edu.cn.

近年来,提高及增强复杂装备柔顺机构精密产品 质量特性可靠性与稳健性受到了国内外学者广泛关 注[2]. 张宪民等[3]在总结3种柔顺机构寿命预测方法 的基础上,阐述了柔性铰链疲劳寿命预测模型及结构 尺寸参数对疲劳寿命的影响,总结了柔顺机构疲劳可 靠性优化设计与分析方法,并指出了柔顺机构可靠性 的研究方向;占金青等[4]提出了一种新的基于基础结 构法的柔顺机构可靠性拓扑优化方法来解决制造与 使用过程中的不确定性因素引起的机构性能退化难 题;万良琪等^[5]构建了一种灰色关联多项式混沌扩展 稳健优化设计新方法,解决了不确定设计参数下的柔 顺机构复杂装备精密产品多质量波动与关联冲突难 题; Wu 等^[6]提出了一种考虑疲劳退化与不确定性的 双稳态柔顺机构可靠性建模与评估方法,并通过实例 验证了该方法的有效性;Dao等[7]针对两自由度柔顺 机构多质量特性波动难题,将Taguchi稳健设计方法、 响应曲面方法、灰色关联分析法与熵权理论相结合, 构建了一种混合稳健优化设计方法; Zhao 等^[8] 针对 不确定设计参数下的柔顺机构性能失稳难题,提出了 一种基于可靠性拓扑优化设计方法,并通过实例验证 了该方法的有效性.从上述文献总结分析可知,现有 针对改善柔顺机构质量特性和防止可靠性疲劳退化 的方法主要集中在以半经验为基础的 Taguchi 稳健 设计方法与可靠性拓扑优化设计方法上.上述两类 方法存在两方面不足:1)可靠性拓扑优化设计方法 对于高度非线性的复杂装备柔顺机构紧密产品,可能 导致其拓扑优化速度较慢和精度较低;2)Taguchi稳 健设计方法过度依赖于设计参数水平值的选取,当参 数水平值和设计参数过多时,会导致试验设计成本的 增加.

在柔顺机构早期质量设计过程中,由于质量特性 与设计参数之间呈现复杂非线性函数关系,往往难 以通过理论推导来构建.现有的针对解决这一难题 的主要方法包括有限元理论方法和伪刚体法,但针 对复杂装备柔顺机构精密产品往往难以实现.近年 来,以计算机代理模型来构建这种复杂非线性函数 关系得到了迅速的发展.Yang等^[9]采用支持向量机 回归(Support vector regression, SVR)代理模型与非支 配排序遗传算法对钣金零件夹具定位设计进行了多 目标优化设计;Fang等^[10]将径向基函数(Radial basis function, RBF)代理模型引入区间不确定性反问题嵌 套优化框架中,减轻了模型计算负担;欧阳林寒等^[11] 针对稳健参数设计中存在的不确定性问题,将因子效 应原则引入到贝叶斯模型平均中,提出了基于因子效 应原则的贝叶斯模型平均稳健性设计建模技术;Luo 等^[12]采用人工蜂群算法与Kriging代理模型相结合 对边坡可靠性进行了分析,并验证了该方法的有效 性;韩忠华^[13]以飞行器设计领域工程优化问题为背 景,总结归纳了影响Kriging模型稳健性和效率的关 键问题,回顾了Kriging模型算法的最新研究进展,分 析提炼了Kriging模型算法的最新研究进展,分 析提炼了Kriging模型算法的优化机制和框架.从现 有文献总结归纳可知:Kriging代理模型与其他代理 模型相比,其优点主要在于能较好地拟合高度非线性 过程,该方法不仅考虑了待测点位置与训练样本位置 的相关关系,而且还考虑了变量的空间相关性,对非 线性过程具有更好的拟合能力.

复杂装备柔顺机构精密产品可靠性优化设计包 含设计参数试验设计、统计建模以及可靠性优化3 个阶段. 在解决复杂装备柔顺机构精密产品质量特 性波动和可靠性疲劳退化难题过程中,主要需要克服 两方面难题:一方面是构建质量特性与设计参数之 间的复杂非线性函数关系;另一方面是构建不确定 设计参数下的可靠性优化设计策略. 据此,本文引入 Kriging代理模型来建立复杂装备柔顺机构精密产品 质量特性模型,并在此基础上采用基于可靠性优化设 计策略(Reliability-based design optimization, RBDO) 构建复杂装备柔顺机构精密产品Kriging-RBDO可 靠性优化设计模型.本文方法与传统柔顺机构可靠 性拓扑优化设计方法相比,该方法将复杂装备柔顺机 构精密产品设计参数试验设计、质量特性统计建模 与可靠性优化策略相结合,引入稳健设计思想,不仅 能降低其设计过程中有限元理论推导及优化的复杂 度,而且融合了抗疲劳特性的可靠性优化设计策略.

复杂装备柔顺机构精密产品工作原理与 质量特性波动分析

复杂装备柔顺机构精密产品是一种以柔顺机构 的弹性变形来传递或转换力与运动的新型免装配微 型精密产品.以复合桥式微动平台为研究载体,如图 1所示.该平台通过压电陶瓷驱动器对输入位移产生 放大作用,其工作原理是通过固定C端,压电陶瓷驱 动器在刚性杆件A,B两输入端的x方向分别产生方 向相反的位移载荷F_{mx}和F_{nx},通过柔性元件(柔性 铰链)对位移载荷进行转换,在D输出端获取放大效 应的输出位移.据此,本文选取复杂装备柔顺精密产 品的放大倍数作为其质量特性进行研究.下文将通过 分析其运动原理来剖析其不确定设计参数对质量特 性波动和可靠性疲劳退化的影响.



图1 复合桥式微动平台

依据复杂装备柔顺机构精密产品高度对称、具 有相同的结构参数特征,对其模型1/4结构运动特 性进行分析,如图2所示.根据柔顺机构力传递方向 分析输入位移与输出位移之间的关系,即如何产生 放大效应.连杆mn受到柔性元件x方向的位移载 荷分别为 F_{mx} 和 F_{nx} ,连杆mn受力矩T作用产生最 大转动角度 θ ,将x方向和y方向产生的位移分别记 为lx和ly,如图3所示;同时,依据力平衡条件、虚功 原理可得复合桥式柔顺微动平台位移放大倍数与 不确定设计参数之间的函数关系 $A = \Delta y/\Delta x = f_A(r, b, t, L_1, L_2)$,详情参见文献[14].



图 2 复合桥式柔顺微动平台 1/4 结构模型



图 3 等效连杆动态分析示意图

在实际工程中,由于复杂装备柔顺机构精密产品 受到加工制造误差、循环载荷、物理参数变异等噪声 因子影响,其结构设计参数往往呈现随机不确定性, 导致结构设计参数的名义值与制造后及使用中的实 际值是有差异的,不可避免地产生质量特性波动和可 靠性疲劳退化现象. 例如, 当设计参数x发生± Δx 波动时, 其质量特性 f_A 会相应产生± Δf_y 的波动, 这必定限制复杂装备柔顺机构产品在高尖端领域稳定性的应用, 因此, 迫切需要针对以柔顺微型机构为研究载体的复杂装备质量提升难题进行研究探索. 同时, 从上述分析可知, 复杂装备柔顺机构精密产品通过有限元理论推导获取质量特性与设计参数之间的函数关系往往存在一定的难度且在推导过程中忽略了一些设计参数的随机不确定性影响, 这可能导致后续可靠性优化设计存在一定的偏差. 据此, 引入Kriging代理模型解决这一难题.

2 构建复杂装备柔顺机构精密产品质量 特性Kriging代理模型

在实际工程中,采用有限元理论方法推导复杂装 备柔顺机构精密产品质量特性与不确定设计参数之 间高度复杂非线性函数关系往往难以实现,因此,本 文引入Kriging代理模型来克服这一难题.Kriging代 理模型是一种估计方差最小的无偏估计插值函数模 型,对非线性较高的实际工程问题具有良好的拟合效 果^[15-17].通常,Kriging代理模型由随机部分和回归部 分组成,其模型可表示为

$$y(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x})\boldsymbol{\beta} + z(\boldsymbol{x}). \tag{1}$$

其中:x表示产品设计变量;y(x)表示待拟合的产品 质量特性Kriging代理模型;f(x)表示产品已知回归 模型; β 表示产品回归模型待定系数;z(x)表示服从 高斯分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机过程,其协方差矩阵可表 示为

$$\operatorname{cov}[z(\boldsymbol{x}_i), z(\boldsymbol{x}_j)] = \boldsymbol{\sigma}^2 \boldsymbol{R}(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j), \qquad (2)$$

这里 $R(x_i, x_j)$ 表示样本空间内任意两个设计样本点 $x_i 与 x_j$ 的相关函数.本文选择高斯函数作为相关性 函数,即

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^n \theta_k |\boldsymbol{x}_{i,k} - \boldsymbol{x}_{j,k}|^2\right). \quad (3)$$

其中:*x_{i,k}*表示设计变量*x_i*的第*k*个分量;*θ_k*表示未 知相关参数,其可通过最大释然估计求得,即

$$\max f(\theta) = \frac{n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|}{2}, \ \theta \ge 0.$$
 (4)

依据Kriging 建模原理,待测样本 *x* 处的目标响应估计值可由下式获得:

$$\hat{y}(\boldsymbol{x}) = f(\boldsymbol{x})\hat{\beta} + \boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{R}^{-1}(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{f}\hat{\beta}).$$
 (5)

其中:β表示β的估计值;**y**表示质量特性列矢量;**f**表 示单位矢量;**r**(**x**)表示预测点与样本点间的相关矢 量,可表示为

$$\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}) = [R(x, x_1), R(x, x_2), \cdots, R(x, x_1)]^{\mathrm{T}}.$$
 (6)

 $\hat{\beta}$ 与方差估计值 $\hat{\sigma}^2$ 可分别通过下式获得:

$$\hat{\beta} = (f^{\mathrm{T}} R^{-1} f)^{-1} f^{\mathrm{T}} R^{-1} y, \tag{7}$$

$$\hat{\sigma}^2 = (y - f\hat{\beta})^{\mathrm{T}} R^{-1} (y - f\hat{\beta})/n.$$
 (8)

由于复杂装备柔顺机构精密产品在全寿命周期 服役过程中往往历经循环载荷作用,采用可靠性拓扑 优化设计方法与伪刚体模型法设计出的方案往往都 不可避免地会产生应力集中现象,导致机构产生疲劳 损伤并失稳.据此,依据拉丁超立方试验设计(Latin hypercube design,LHD)和有限元数值模拟建立复杂 装备柔顺机构精密产品质量特性Kriging代理模型; 并在此基础上引入RBDO可靠性优化设计策略来构 建复杂装备柔顺机构精密产品可靠性优化设计模型.

3 建立复杂装备柔顺机构精密产品 Kriging-RBDO可靠性优化设计策略模型

设计决定了复杂装备柔顺机构精密产品稳健性和可靠性.在早期设计阶段,通过采用有效的可靠性优化设计策略降低产品对外界噪声因子的干扰,才是实现其可靠性、稳健性增长的正确做法.根据这一指导思想,本文在复杂装备柔顺机构精密产品质量特性Kriging代理模型的基础上,引入RBDO优化设计策略^[18-20]来实现产品的抗疲劳、抗退化及抗干扰特性.

本文采用结构可靠性分析方法中Hasofer-Lind (HL)可靠性指数法求解可靠性指标 β .设在失效域中 最可能的失效点(设计验算点)为 $p^*(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*)$, 该失效点一定在失效边界 $f_{\text{Kriging}}(x_1, x_2, \cdots, x_n) =$ 0上,将复杂装备柔顺机构精密产品非线性功能函数 在设计验算点处展开,即

$$f_{\text{Kriging}}(\boldsymbol{x}) = f_{\text{Kriging}}(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_{\text{Kriging}}}{\partial x_i}\right)_{p^*} (x_i - x_i^*).$$
(9)

由式(9)可得复杂装备柔顺机构精密产品功能函 数均值与标准差如下:

$$\mu_{f_{\mathrm{Kriging}}} = f_{\mathrm{Kriging}}(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_{\mathrm{Kriging}}}{\partial x_i}\right)_{p^*} (\mu_{x_i} - x_i^*), \quad (10)$$

$$\sigma_{f_{\text{Kriging}}} = \left[\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f_{\text{Kriging}}}{\partial x_i} \Big|_{P^*} \sigma_{x_i} \right)^2 \right]^{1/2}.$$
(11)

因此可得复杂装备柔顺机构精密产品可靠性指标β 和失效概率P_{fĸriging}如下:

$$\beta = \frac{\mu_{f_{\rm Kriging}}}{\sigma_{f_{\rm Kriging}}} =$$

$$\frac{f_{\mathrm{Kriging}}(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f_{\mathrm{Kriging}}}{\partial x_i}\right)_{p^*} (\mu_{x_i} - x_i^*)}{\left[\left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_{\mathrm{Kriging}}}{\partial x_i}\Big|_{P^*} \sigma_{x_i}\right)^2\right]^{1/2}},$$
(12)

$$P_{f_{\text{Kriging}}} = P[f_{\text{Kriging}} < 0] = \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\sigma_{f_{\text{Kriging}}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{-\mu_{f_{\text{Kriging}}}}{\sigma_{f_{\text{Kriging}}}}\right)\right] = 1 - \Phi(\beta).$$
(13)

由于设计验算点*p**在求解复杂装备柔顺机构 精密产品可靠性指标β之前是未知的,本文采用HL 迭代算法,直至算出前后两次β值小于允许误差.本 文依据上述RBDO优化设计策略(Reliability index approach, RIA)中可靠性指数方法构建基于Kriging 代理模型的复杂装备柔顺机构精密产品RIA可靠性 优化设计模型,即

Find x

$$\begin{cases} \max_{\boldsymbol{x}} f_k^{\text{Kring}}(\boldsymbol{x}). \\ \text{s.t.} \begin{cases} \beta_i^{\text{Kriging}} \ge \beta_i^t, \ i = 1, 2, \cdots, m; \\ \boldsymbol{x}_j^L \le \boldsymbol{x}_j \le \boldsymbol{x}_j^U, \ j = 1, 2, \cdots, n. \end{cases} \end{cases}$$
(14)

其中: x_j^L 和 x_j^U 分别为设计变量的上、下限, β_i^{Kriging} 为模型可靠性指标, β_i^t 为目标可靠性指标, $f_k^{\text{Kring}}(\boldsymbol{x})$ 为质量特性功能函数.



图 4 复杂装备柔顺机构精密产品 Kriging-RBDO 可靠性优化设计流程

根据整个复杂装备柔顺机构精密产品质量特性

Kriging-RBDO可靠性优化设计思路可构建其流程步骤,如图4所示.

4 实例研究

4.1 复合桥式微动平台质量特性波动难题分析

复合桥式微动平台如图5所示,该平台具有高度 对称的特点.其工作原理是在驱动端通过压电陶瓷 驱动器产生输入位移载荷,利用柔性元件发生弹性形 变并将输入位移传递给输出端,使输出位移产生放大 作用.相对于宏观机械结构,微型机构特征尺寸和器 件性能对于设计参数的不确定性更敏感.在实际复 杂工况下,由于材料属性、加工误差、随机载荷及疲劳 损伤等噪声因素产生了不确定性影响,使得复合桥式 微动平台的运动精度、可靠性、稳健性、抗疲劳损伤 能力均较难满足使用要求,导致其质量特性(放大倍 数)波动和退化失效.合理的结构参数可靠性优化设 计是复合桥式微动平台稳定可靠运行的保证.据此, 可采用本文提出的方法来解决不确定设计参数下的 复合桥式微动平台质量特性波动和退化失效难题.



图 5 复合桥式微动平台结构示意图

4.2 复合桥式微动平台设计参数拉丁超立方实验 设计

根据复合桥式微动平台结构的高度对称性,选取 1/4的复合桥式微动平台模型进行分析.依据文献采 用卡式第二定理对正圆形柔性铰链得到其封闭形式 的柔度公式及工程设计经验,据此,本文选取复合桥 式微动平台中柔性铰链厚度b、柔性铰链半径r、柔性 铰链宽度t、连杆长度L₂、连杆宽度L₁作为试验设计 参数,并确定设计参数分布类型如表1所示.

表1	复合桥式微动平台设计参数特性	mm
12.1	发白竹式成幼士口及时参数行任	111111

设计变量	物理意义	低水平	高水平	分布类型
r	柔性铰链半径	2.98	3.02	高斯分布
L_2	连杆长度	10.58	10.63	高斯分布
L_1	连杆宽度	8.97	9.02	高斯分布
t	柔性铰链宽度	0.58	0.62	高斯分布
b	柔性铰链厚度	9.97	10.02	高斯分布



图 6 复合桥式微动平台有限元模型

表2 复合桥式微动平台LHD试验设计组合方案结果

No.	r	L_2	L_1	t	b	$\sigma_{\rm max}$	y_A
1	2.9880	10.5984	8.9857	0.6175	10.0193	11.1401	7.0226
2	2.9954	10.5860	8.9842	0.5948	10.0000	11.1567	7.0630
3	3.0131	10.6092	8.9916	0.603 1	10.0016	10.8633	7.1380
4	3.0123	10.6027	8.9818	0.5962	10.0163	10.9061	7.1298
5	2.9828	10.6196	9.008 1	0.5801	9.9710	11.4778	7.0047
6	2.9966	10.6203	9.0168	0.5907	10.0181	11.0204	7.0776
7	3.002 5	10.6129	8.9719	0.5993	9.9962	10.9504	7.0872
8	2.9970	10.5812	8.9961	0.5933	9.9716	11.1614	7.0724
9	3.0068	10.5830	8.9754	0.5859	10.0092	10.9188	7.1014
10	3.005 1	10.5945	9.0063	0.6166	9.9752	10.9596	7.1154
11	2.9914	10.6064	9.0196	0.6077	9.9738	11.1018	7.0547
12	3.0006	10.6150	8.9738	0.6083	10.0026	11.0996	7.0887
13	2.9808	10.5969	9.0121	0.5867	9.9820	11.5293	7.0089
14	3.0186	10.6245	8.9701	0.597 1	9.9887	11.0750	7.1463
15	2.9855	10.6219	9.003 2	0.6102	9.9931	11.2972	7.0196
16	2.9839	10.6290	9.0057	0.6146	9.9947	11.3763	7.0148
17	2.9944	10.6083	8.9947	0.6025	9.9922	11.0352	7.0530
18	2.9898	10.595 3	9.0098	0.5833	10.0046	11.4208	7.0593
19	3.0016	10.5869	9.0109	0.6002	9.9774	10.7644	7.1000
20	2.9934	10.6112	8.9978	0.5814	9.9778	11.1906	7.0465
21	3.0167	10.623 5	8.9778	0.5884	9.9728	10.9911	7.1364
22	3.0147	10.5991	8.9804	0.6017	9.9868	10.8433	7.1427
23	2.9814	10.5844	8.9800	0.6155	10.0108	11.4063	6.9917
24	3.0117	10.591 1	8.9727	0.6063	9.9802	10.9421	7.1216
25	2.9902	10.5883	8.9763	0.5921	10.0081	11.1556	7.0249
26	2.9990	10.5917	8.9965	0.6043	10.0063	10.9366	7.0909
27	3.0043	10.6010	9.0137	0.5900	10.0126	10.8437	7.1079
28	3.0157	10.605 3	8.9895	0.6183	10.0146	11.008 1	7.1452
29	2.9984	10.6022	8.9904	0.6196	9.9843	10.9506	7.075 1
30	3.0179	10.625 1	9.0153	0.6096	9.9858	11.2120	7.1658
31	2.9921	10.6047	9.0147	0.5879	9.9980	11.2198	7.0607
32	3.0101	10.6265	9.0009	0.5912	9.9890	10.9994	7.1209
33	3.0072	10.6123	9.0179	0.5847	10.0153	10.8369	7.1225
34	3.0037	10.6284	9.0044	0.605 8	10.0123	11.0239	7.0970
35	3.0094	10.5899	8.9880	0.6117	9.9990	10.8226	7.1247
36	3.0090	10.6168	8.9997	0.6136	9.9837	11.0143	7.1298
37	2.9886	10.5929	8.983 5	0.595 5	10.0057	11.3202	7.0317
38	2.9847	10.6156	8.9865	0.5984	9.9791	11.2540	7.0141
39	3.0198	10.6182	9.0015	0.5826	9.9965	10.7779	7.1611
40	2.9868	10.5817	8.9926	0.6126	9.9908	11.3072	7.0207

根据设计空间和LHD原理,安排复合桥式微动 平台40组试验设计组合方案(其中20组用于模型训 练,20组用于模型测试).在此基础上,通过有限元仿 真平台ANSYS workbench建立各试验设计组合方案 对应的有限元模型,获取各试验设计组合方案质量特 性响应值(放大倍数yA和最大等效应力σmax);在复 合桥式微动平台有限元建模过程中,采用Solid45单 元建立模型,柔性元件网格划分最小单元为0.1 mm, 在驱动端输入压力为1μm的位移载荷,复合桥式微 动平台有限元模型如图6所示,其各试验设计组合方 案质量特性有限元数值模拟结果如表2所示.

4.3 构建复合桥式微动平台质量特性Kriging代理 模型及预测性能分析

Kriging代理模型构建采用LHD试验设计技术, 构建40组试验设计方案,其中的20组试验设计方 案组合用于构建Kriging代理模型,20组用于测试 Kriging代理模型.根据有限元数值模拟仿真结果, 采用Kriging代理模型建模方法(选用一阶回归函数 和高斯函数)分别构建复合桥式微动平台质量特性 Kriging代理模型 $f_{y_A}^{\text{Kriging}}$ 和最大等效应力Kriging代 理模型 $g_{\sigma_{\text{max}}}^{\text{Kriging}}$ 和最大等效应力Kriging代 性,引入均方根误差(Root mean square error, RMSE)、 最大绝对误差(Maximum absolute error, MAE)、平均 绝对误差(Average absolute error, AAE)及决定系数 R^2 来测度模型的预测性能^[21],其各指标计算如下:

RMSE =
$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 / n}$$
, (15)

$$MAE = \max|y_i - \hat{y}_i|, \qquad (16)$$

$$AAE = \sum_{i=1}^{n} |y_i - \hat{y}_i| / n,$$
 (17)

$$R^{2} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \left(y_{i} - \hat{y}_{i} \right)^{2} / \sum_{i=1}^{n} \left(y_{i} - \bar{y} \right)^{2}.$$
 (18)

其中: y_i表示质量特性实际有限元仿真值, ŷ_i表示质量特性Kriging代理模型预测值, n 表示测试样本点数.由式(15)~(18)可得出复合桥式微动平台质量特性Kriging代理模型各项精度检验指标, 如表3所示.

表3 复合桥式微动平台质量特性Kriging 代理模型预测性能指标

Kriging模型	RMSE	MAE	AAE	R^2
最大等效应力 $g^{ m Kriging}_{\sigma_{ m max}}$	0.061 5	0.1668	0.0311	0.8646
放大倍数 $f_{y_A}^{\mathrm{Kriging}}$	0.0027	0.0074	0.001 3	0.9970
许用值	< 0.1	< 0.2	< 0.05	> 0.85

由表3可知,所构建的Kriging模型各项指标均

满足实际工程设计领域许用值.同时,图7和图8的 Kriging模型预测与实际有限元仿真数值非常接近. 因此可认为复合桥式微动平台质量特性Kriging模型 满足精度要求.



图 7 最大等效应力Kriging模型和放大倍数 Kriging模型精度预测精度

4.4 建立复合桥式微动平台质量特性 Kriging-RBDO可靠性优化设计策略模型

在完成复合桥式微动平台质量特性Kriging模型的基础上,依据复合桥式微动平台工作产生的最大等效应力不应超过材料的屈服极限34MPa,将其作为可靠性优化设计模型的应力概率约束条件.在给定设计空间内,采用式(13)、(14)建立复合桥式微动平台可靠性优化设计模型,即

Find x

$$\begin{cases} \max_{\boldsymbol{x}} f_{y_A}^{\mathrm{Kriging}}(\boldsymbol{x}). \\ & \\ \mathrm{s.t.} \begin{cases} \Pr[\sigma_p - g_{\sigma_{\max}}^{\mathrm{Kriging}}(\boldsymbol{x}) \leqslant 0] \leqslant \Phi(-\beta^t); \\ x_r^L \leqslant x_r \leqslant x_r^U, \ x_{L_2}^L \leqslant x_{L_2} \leqslant x_{L_2}^U; \\ x_{L_1}^L \leqslant x_{L_1} \leqslant x_{L_1}^U, \ x_t^L \leqslant x_t \leqslant x_t^U; \\ x_b^L \leqslant x_b \leqslant x_b^U. \end{cases}$$

$$(19)$$

其中: f^{Kriging} 为放大倍数 Kriging 模型, g^{Kriging} 为最 大等效应力 Kriging 模型, β^t 为目标可靠性指标, σ_p 为 材料屈服极限.本文采用遗传算法对复合桥式微动 平台可靠性优化设计模型进行全局优化获取稳健可 靠最优解.根据复合桥式微动平台高精密设计要求, 本文采用3 Sigma可靠度作为优化模型概率约束,其 可靠性优化设计方案前后对比如表4所示.

衣4 可靠住优化反打力条削后对比							
方案	r	L_2	L_1	t	b	放大倍数	可靠度
初始设计方案	2.9300	10.5000	8.5000	0.5500	10.2000	6.6842	_
可靠性设计方案	2.9360	10.4761	8.9360	0.5360	10.1040	6.7508	99.999 994 %

長4 可靠性优化设计方案前后对比

4.5 结果分析与仿真验证

由表4可知,在可靠性指标β约束为3Sigma的条件下,复合桥式微动平台可靠性设计方案稳健性达到了5Sigma水平,其相应可靠度为99.999994%;相比初始设计方案,其质量特性放大倍数增加了0.0666倍,相应增长幅度为0.9964%;根据可靠性优化设计方案前后对比分析可知,以可靠性概率为约束的设计方案在一定设计域内不仅提高了质量特性放大倍数,而且增强了复合桥式微动平台设计方案的可靠性及抗干扰能力;同时,严格的可靠性约束更能保证复合桥式微动平台的可靠性.为了验证本文方法的有效性,从Monte Calro模拟和有限元模拟两个角度进行验证.

从 Monte Calro 模拟仿真角度验证. 采用直接 Monte Calro 方法对复合桥式微动平台结构功能函 数进行2×10⁴ 次模拟仿真,得到其失效概率如图8 所示. 通过 Monte Calro 仿真可知,在5000次之后收 敛所得可靠性优化设计方案的失效概率估计值为 1.83%(相应可靠度为98.17%),与本文方法得到的可 靠性设计方案的可靠度很接近,验证了本文方法的有 效性.



图 8 复合桥式微动平台失效概率 Monte Calro 仿真

从有限元模拟仿真角度验证.通过对比分析复 合桥式微动平台可靠性优化设计方案前后应力集 中部位的最大等效应力来分析其抗疲劳特性.有限 元仿真模拟可靠性优化设计方案前后的应力分布如 图9所示,可靠性优化设计方案的应力集中部位产 生最大等效应力为13.1880MPa,相比于初始设计方 案应力集中部位产生的最大等效应力13.3420MPa, 该部位最大等效应力降低了 0.1540MPa(减少了 1.1542%),表明本文提出的可靠性优化设计方法能 明显降低复合桥式微动平台应力集中部位的最大等 效应力,从而减小复合桥式微动平台往复运动导致结构疲劳断裂失效的风险概率.



图 9 复合桥式微动平台可靠性优化设计 前后应力分布云图对比

5 结 论

针对不确定设计参数情形下的复杂装备柔顺机 构精密产品质量特性波动和退化失效难题,本文构建 了复杂装备柔顺机构精密产品Kriging-RBDO可靠 性优化设计策略模型.该方法首先通过Kriging代理 模型建立了复杂装备柔顺机构精密产品质量特性与 不确定设计参数之间复杂非线性函数关系;在此基 础上,结合RBDO可靠性优化设计策略构建了不确定 设计参数情形下的复杂装备柔顺机构精密产品可靠 性优化设计模型,并通过Monte Calro模拟仿真和有 限元数值模拟仿真验证了本文方法的有效性.仿真 结果表明,本文提出的方法不仅增强了复杂装备柔顺 机构精密产品对不确定性因素的抗干扰能力,而且降 低了循环载荷下的定品退化失效风险,为解决不确定 设计参数情形下的复杂装备柔顺机构精密产品质量 特性波动和退化失效难题提供了一条有效途径.

参考文献(References)

 Howell L L, Magleby S P, Olsen B M. Handbook of compliant mechanisms[M]. New York: Wiley, 2013: 1-20.

- [2] Li Y P, Liu S F, Xu L, et al. Decision target adjustment quality function deployment network with an uncertain multi-level programming model for a complex product[J]. J of Grey System, 2015, 27(3): 132-150.
- [3] 张宪民, 汪启亮. 柔顺机构疲劳可靠性及损伤识别 研究进展[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(10): 190-197.

(Zhang X M, Wang Q L. Research progress of fatigue reliability and damage identification of compliant mechanisms[J]. J of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(10): 190-197.)

- [4] 占金青,张宪民.基于基础结构法的柔顺机构可靠性 拓扑优化[J].机械工程学报,2010,46(13):42-47.
 (Zhan J Q, Zhang X M. Reliability-based topology optimization of compliant mechanisms by using foundation structure approach[J]. J of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 42-47.)
- [5] 万良琪,陈洪转,欧阳林寒,等.复杂装备精密产品 Grey-PCE多质量特性稳健优化设计[J].系统工程与 电子技术,2018,40(2):472-481.
 (Wan L Q, Chen H Z, Ouyang L H, et al. Multi-quality characteristics robust design optimization based on grey-polynomial chaos expansion for sophisticated equipment products[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(2): 472-481.)
- [6] Wu J N, Yan S Z, Li J L, et al. Mechanism reliability of bistable compliant mechanisms considering degradation and uncertainties: Modeling and evaluation method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(23/24): 10377-10388.
- [7] Dao T P, Huang S C. Optimization of a two degrees of freedom compliant mechanism using Taguchi method-based grey relational analysis[J]. Microsystem Technologies, 2017(23): 1-16.
- [8] Zhao Q, Chen X, Ma Z D, et al. Reliability-based topology optimization using stochastic response surface method with sparse grid design[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1-13.
- [9] Yang Y, Wang Z Q, Yang B, et al. Multiobjective optimization for fixture locating layout of sheet metal part using SVR and NSGA-II[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(2017): 1-10.
- [10] Fang H, Gong C L, Li C N, et al. A surrogate model based nested optimization framework for inverse problem considering interval uncertainty[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(2018): 1-15.
- [11] 欧阳林寒, 马义中, 汪建均, 等. 基于模型不确定性的 响应曲面建模[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1818-1824.

(Ouyang L H, Ma Y Z, Wang J J, et al. Response surface modeling based on model uncertainty[J]. Systems

Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1818-1824.)

- [12] Luo X F, Li X, Zhou J, et al. A Kriging-based hybrid optimization algorithm for slope reliability analysis[J]. Structural Safety, 2012, 34(1): 401-406.
- [13] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
 (Han Z H. Kriging surrogate model and its application to design optimization: A review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225.)
- [14] Tseytlin Y M. Notch flexure hinges: An effective theory[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(9): 3363-3368.
- [15] Kleijnen J P C. Kriging metamodeling in simulation: A review[J]. European J of Operational Research, 2009, 192(3): 707-716.
- [16] Kleijnen J P C, Beers W C M V. Robustness of Kriging when interpolating in random simulation with heterogeneous variances: Some experiments[J]. European J of Operational Research, 2005, 165(3): 826-834.
- [17] Beers W C M V, Kleijnen J P C. Customized sequential designs for random simulation experiments: Kriging metamodeling and bootstrapping[J]. European J of Operational Research, 2008, 186(3): 1099-1113.
- [18] Jiang C, Qiu H, Gao L, et al. An adaptive hybrid singleloop method for reliability-based design optimization using iterative control strategy[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017, 56(2017): 1-16.
- [19] Huang Z L, Jiang C, Zhou Y S, et al. An incremental shifting vector approach for reliability-based design optimization[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, DOI: 10.1007/s00158-015-1352-7.
- [20] Mansour R, Olsson M. Response surface single loop reliability-based design optimization with higher-order reliability assessment[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(1): 63-79.
- [21] Jin R C, Chen W, Simpson T W. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2001, 23(1): 1-13.

作者简介

陈洪转(1977-), 女, 教授, 博士, 从事质量管理等研究, E-mail: hongzhuanchen@nuaa.edu.cn;

万良琪(1991-),男,博士生,从事复杂装备质量与可靠

李亚平 (1985-), 女, 讲师, 博士, 从事质量管理的研究, E-mail: annelee1986@163.com.

性、稳健优化设计的研究, E-mail: wanliangqi@nuaa.edu.cn; 欧阳林寒(1987-), 男, 讲师, 博士, 从事质量工程的研 究, E-mail: ouyang@nuaa.edu.cn;