

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.05.014

考虑间隙的起落架收放机构运动精度可靠性分析

徐向前¹, 王宁博², 印寅¹, 鄢雨濛¹, 魏小辉¹, 聂宏¹

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016;

2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 随着飞机起落架收放机构的复杂度不断提升, 多关节间隙耦合对机构运动精度的影响更加显著。复杂机构的运动精度可靠性问题呈现出非线性程度高、影响参数多、样本量少的特点, 研究难度极大。针对该问题, 提出了一种结合理论分析、动力学联合仿真以及间隙磨损的机构运动精度可靠性分析方法。首先, 建立考虑 7 处关节间隙的收放机构动力学模型, 研究各关节间隙对机构收放精度的独立影响及耦合影响。然后, 建立关节磨损量随收放次数增加的分析模型, 获取间隙的变化规律, 进而建立收放机构运动精度随收放次数变化的可靠性分析模型。最后, 基于自适应 Kriging 代理模型对起落架收放机构的可靠性进行分析, 给出可靠性随机收放次数的变化规律。研究表明, 各处结构间隙对机构收放运动精度都有不同程度的影响, 机构失效概率呈现先平稳后急剧上升的趋势。所提方法为起落架复杂机构运动可靠性评估提供重要的分析手段。

关键词: 起落架收放机构; 动力学仿真; 间隙磨损; Kriging 模型; 运动精度可靠性

中图分类号: TB114.3; V226

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2024)05-0909-13

Analysis of Motion Accuracy Reliability for Landing Gear Retracting Mechanism Considering Clearances

XU Xiangqian¹, WANG Ningbo², YIN Yin¹, YAN Yumeng¹, WEI Xiaohui¹, NIE Hong¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: With the increasing complexity of aircraft landing gear retractable mechanism, the effect of multiple structural clearances coupling on the motion accuracy of the mechanism is more significant. The motion accuracy reliability of complex mechanism presents the characteristics of high nonlinear degree, many influencing parameters and small sample size, so it is very difficult to study. For this problem, this paper proposes a method for analyzing the motion accuracy reliability of the mechanism by combining theoretical analysis, dynamics joint simulation, and clearance wear. Firstly, a dynamic model of the retractable mechanism considering seven structural clearances is established to study the independent and coupled effects of structural clearances on the retracting accuracy. Then, the analysis model of the structural wear with the increase of retracting cycles is established to obtain the change rule of clearance, and then the reliability analysis model of retractable mechanism motion accuracy with the change of retracting cycles is established. Finally, based on the adaptive Kriging surrogate model, the reliability of the landing gear retractable mechanism is analyzed, and the variation law of reliability with retracting cycles is provided. The research results show that the structural clearances at different locations have varying degrees of impact on the motion

基金项目: 国家自然科学基金(52172368, 52275114); 江苏省自然科学基金(BK20220135)。

收稿日期: 2024-02-22; **修订日期:** 2024-05-17

通信作者: 印寅, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yinyin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 徐向前, 王宁博, 印寅, 等. 考虑间隙的起落架收放机构运动精度可靠性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 909-921. XU Xiangqian, WANG Ningbo, YIN Yin, et al. Analysis of motion accuracy reliability for landing gear retracting mechanism considering clearances[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 909-921.

accuracy of the mechanism, and the probability of mechanism failure shows a trend of initially stabilizing and then sharply increasing. The proposed analysis method provides an important analytical means for the motion reliability evaluation of complex landing gear mechanisms.

Key words: landing gear retractable mechanism; dynamic simulation; clearance wear; Kriging model; motion accuracy reliability

起落架系统是飞机的重要组成部分,其工作性能直接影响着飞行器停放、滑跑和起降任务的安全。起落架需要在狭小的机身空间内精确、可靠地完成收放运动,同时保持稳定可靠的锁定状态。根据加拿大TSB的2021统计报告^[1],2021年间飞机着陆过程中出现事故83起,起落架收放故障为18起,占比21.7%。而从2011年至2021年间,飞机发生着陆事故1113起,起落架故障237起,占比21.3%。由此可见,起落架能否可靠地收放到位对于保障飞机的安全使用具有直接且重要的影响。

起落架收放机构往往因其关节位置较多,从而存在多处结构间隙耦合的情况,因此易出现起落架收放运动精度受结构间隙影响更加显著的现象。因此,深入开展起落架收放机构的可靠性研究具有重大意义。

针对机构动力学,国内外相关学者对其进行了大量的研究:王钰龙等^[2]于2015年进行了运动副含间隙情况下起落架机构卡滞位置的载荷分析;印寅等^[3]于2015年建立了起落架收放系统动力学模型,研究了混合系统中各关键参数对起落架收放性能的影响;陈放等^[4]于2017年提出了一种同时考虑尺寸公差和运动副间隙的机构可靠性设计方法;印寅^[5]于2017年建立了起落架动力学模型,分析得到了装配误差和结构间隙对机构收放传动特性的影响结果;Chen等^[6]于2023年以九连杆机构为研究对象,分析了考虑多个润滑间隙时滑块的动态响应和动态精度可靠性;杨逸波等^[7]于2023年建立考虑尺寸、杆长误差及关节间隙的机构精度模型,采用不同方法对机构的位置精度可靠性进行了分析。以上研究大部分在间隙确定的条件下对机构进行分析,从而忽略了实际工程中间隙会随着磨损而发生变化的情况。

近年来,学者们对含间隙的机构进行了一系列研究:Shi等^[8]于2016年采用Archard模型分析了关节处随着磨损间隙增加时空间四杆机构的运动精度变化情况;周姿言等^[9]于2019年利用Archard模型计算了舱门铰链的磨损量,采用Monte Carlo评估舱门铰链的磨损对运动精度可靠性的影响;周长聪等^[10]于2021年考虑了摩擦因数以及不同收放次数的影响,建立了某起落架收放机构的可靠性模型,利用自适应Kriging方法对机构的可靠性和灵

敏度进行了分析;Zhuang等^[11]于2022年基于Archard模型与蒙特卡洛法,对经历非均匀磨损的高精度平面机构进行了运动可靠性分析。以上研究主要针对某一处的间隙磨损情况进行分析,没有考虑不同部位间隙磨损之间的相互影响。尹明德等^[12]于1995年建立了锁机构磨损可靠性的数学模型,给出了货舱门锁机构系统磨损可靠性分析和评估的一般方法;潘柏松等^[13]于2022年建立了考虑磨损与变形的齿轮减速器模型,并对其进行了运动精度可靠性分析与优化设计;Li等^[14]于2022年建立了基于制造参数和考虑接触疲劳磨损的多体动力学模型,并提出了一种基于制造参数的开关机构运行可靠性预测模型;Qian等^[15]于2022年研究了带间隙旋转运动副对换刀机器人的动力学特性以及运动可靠性的影响;高顺等^[16]于2023年建立了含磨损间隙的九连杆机构动力学模型,分析了驱动速度对机构动力学特性和运动精度可靠性的影响。

综上所述,目前的研究主要在假定间隙确定的情况下分析机构的可靠性,对实际工程中结构间隙会随着铰接处的磨损而变化的情况分析较少。同时,对于考虑多个磨损间隙的复杂机构动力学特性以及动态精度可靠性的研究还比较有限。此外,现有研究大多数聚焦于某瞬时点的可靠性问题,较少考虑整个运行周期内具有时变特征的可靠性信息。

因此,本文通过建立考虑间隙的高精度动力学仿真模型,研究结构间隙、磨损因素以及初始间隙不确定性对机构运动可靠性的影响。从而找到收放机构结构间隙的合理范围,以保证收放机构的运动精度可靠性满足需要。

1 起落架收放机构动力学仿真分析

1.1 收放机构功能原理分析

前起落架收放机构主要由收放作动筒、上位锁、解锁作动筒、悬挂摇臂、折叠锁杆、阻力撑杆和主支柱组成,如图1所示为起落架位于下位锁定状态。

起落架的收放运动主要由收上到位和放下到位组成。收上到位运动包括:首先作动筒回缩,带着折叠撑杆上折,实现折叠撑杆锁解锁。接着作动筒带动阻力撑杆、折叠撑杆和悬挂摇臂组成的杆系结构实现起落架的收上运动,最后当起落架收起到上极限位置时,安置于主支柱处的锁柱与上位锁结

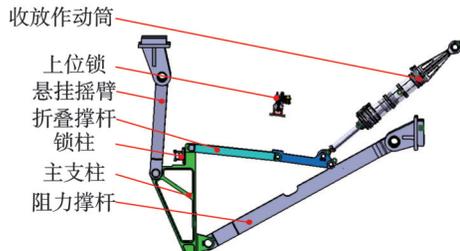


图 1 起落架位于下位锁定状态示意图

Fig.1 Diagram of landing gear in the down and locked position

合完成机械锁定,最终实现起落架的收上到位运动。放下到位运动包括:首先作动筒伸出,同时上位锁供压实现解锁动作;然后作动筒通过上撑杆带动阻力撑杆、下撑杆和悬挂摇臂组成的杆系结构实现起落架的放下运动;最后当起落架放下到下极限位置时折叠撑杆完全展开,起落架完成一个完整的放下锁定动作。收放运动功能框图如图 2 所示。

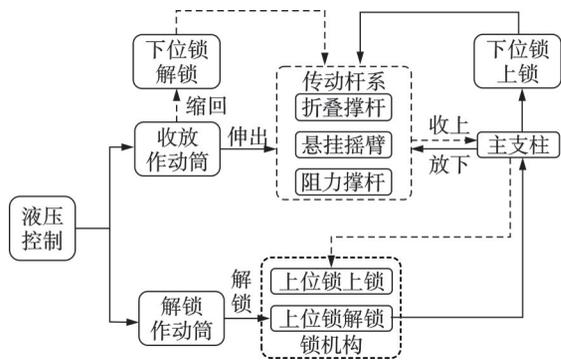


图 2 起落架收放系统功能框图

Fig.2 Functional block diagram of the landing gear retracting system

1.2 考虑间隙的动力学模型

基于多体动力学仿真软件 LMS Virtual.Lab Motion 建立起落架收放机构的仿真模型,如图 3 所示,机构共有 7 处结构间隙:悬挂摇臂与耳片(间隙 1)、悬挂摇臂与主支柱(间隙 2)、主支柱与阻力撑杆(间隙 3)、主支柱与折叠撑杆(间隙 4)、折叠撑杆与阻力撑杆(间隙 5)、折叠撑杆与耳片(间隙 6)以及阻力撑杆与耳片(间隙 7)。

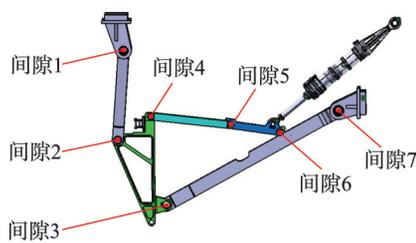


图 3 起落架收放机构间隙位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of clearances in the landing gear retractable mechanism

本文采用多个球面接触来模拟孔轴间隙配合,如图 4 所示,面表示孔壁结构,尺寸为 D ;多球表示轴结构,尺寸为 d ;间隙则为 $\Delta = D - d$,同时在接触的部位添加点面高副,限制孔轴在轴向上的自由度,同时使用赫兹力模型计算接触单元的接触力。

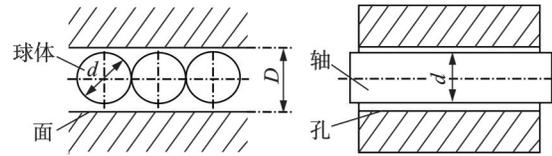


图 4 多个球面接触的孔轴间隙模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of multi-spherical contact hole-shaft clearance model

球体与拉伸面接触力模型中,使用如图 5 所示的赫兹力模型计算接触单元的接触力。此种单元的接触力大小由穿透深度决定,穿透深度由拉伸体厚度以及球与拉伸面在接触面法线方向的相对速度决定,摩擦力的大小取决于球与拉伸面的接触面切向的相对速度,接触刚度和阻尼特性取决于两构件的弹性模量、恢复因数、泊松比等参数。

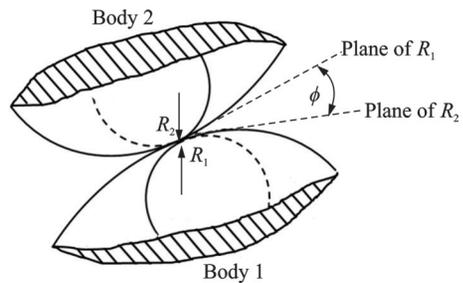


图 5 两单元的接触力模型

Fig.5 Two-unit contact force model

综上所述,针对这 7 处位置建立带结构间隙的动力学模型,以此模拟起落架多次收放中多处关节受到不同程度的磨损时,机构最终上锁位置的变化情况。

1.3 收放精度影响分析

本文使用机构收上锁定时锁柱位置与上锁理论位置之间的距离作为判别结构间隙对机构运动精度影响的标准,其位置距离的动态变化通过在模型中添加 Motion Sensors 以进行实时监控, Motion Sensors 可用于测量力、力矩、角度和距离、速度、加速度等的分量或大小, Sensor Axis 作为 Motion Sensor 的输入量,需在每个测量位置处定义一个 Sensor Axis System。

基于考虑间隙和偏差的动力学模型,在锁柱和上位锁的位置分别建立 Sensor axis system 1 和 Sensor axis system 2,如图 6 所示,通过 Motion Sensors 中的函数表达式获取收放机构锁柱与上位

锁之间的动态相对位置关系,从而开展机构收放精度单因素及双因素耦合影响分析。

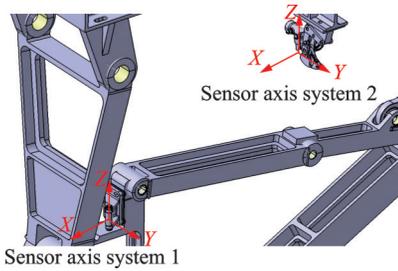


图6 坐标系位置示意图

Fig.6 Coordinate system position diagram

(1)单位置结构间隙影响

不考虑机构其他参数变化,仅对某处的结构间隙进行调整,仿真计算得到如表1所示的机构X轴和Z轴方向上的变化量随间隙大小变化的偏移情况(收放机构Y轴方向上的偏移量随间隙改变的变化很小)。表1仅列出了部分结果,对于表中未完全列出的,分别由图7和图8体现。

由图7可知,各结构间隙均会造成收放机构的上锁位置在X方向上的偏移。其中,间隙3位置处的结构间隙影响最大且造成X方向上出现正向偏移,其余位置均对X方向产生负向偏移影响。间隙1、间隙2、间隙7三处位置对X方向上造成的偏移量影响次之,间隙4、间隙5位置处的结构间隙影响最小。

由图8可知,各结构间隙均会造成收放机构的上锁位置在Z方向上的负向偏移。其中,间隙1、间

表1 收放机构在不同结构间隙下的参数

Table 1 Parameters of retractable mechanism in various structural clearances

间隙位置	间隙大小/mm	X轴偏移量/mm	Z轴偏移量/mm
间隙1	0.2	-0.088 5	-1.009 0
	0.6	-0.169 1	-1.384 9
	1	-0.249 4	-1.760 4
	1.4	-0.329 5	-2.135 8
间隙2	0.2	-0.087 3	-1.003 8
	0.6	-0.165 3	-1.367 9
	1	-0.243 0	-1.731 4
	1.4	-0.320 6	-2.094 5
间隙3	0.2	0.004 1	-1.049 3
	0.6	0.117 2	-1.507 7
	1	0.230 1	-1.964 0
	1.4	0.343 0	-2.418 3
间隙7	0.2	-0.066 7	-1.030 8
	0.6	-0.101 6	-1.450 3
	1	-0.136 5	-1.868 2
	1.4	-0.171 3	-2.284 9

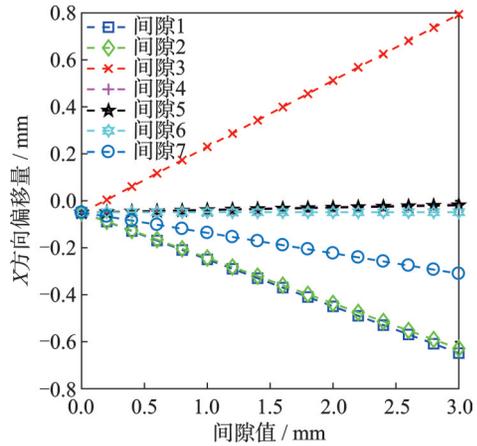


图7 X方向偏移随间隙变化情况

Fig.7 Variation of X-directional offset with changes in clearances

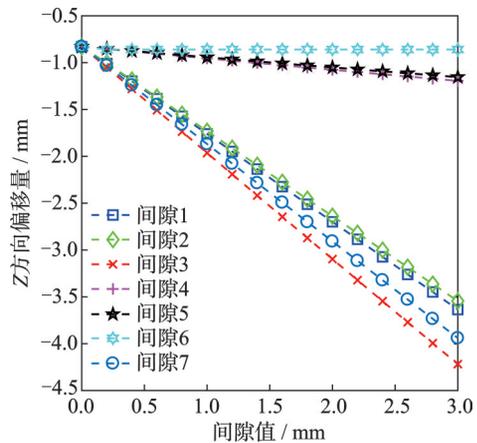


图8 Z方向偏移随间隙变化情况

Fig.8 Variation of Z-directional offset with changes in clearances

隙2、间隙3、间隙7这4处位置间隙对Z方向偏移影响最明显,间隙6位置处影响最小,间隙3位置处影响最大。

(2)双位置结构间隙耦合影响

当结构间隙取1.4 mm时,仿真计算结构间隙两两互相影响下X轴和Z轴方向上的偏移量变化情况(收放机构Y轴方向上的偏移量随耦合间隙改变的变化依旧很小),结果如表2所示。

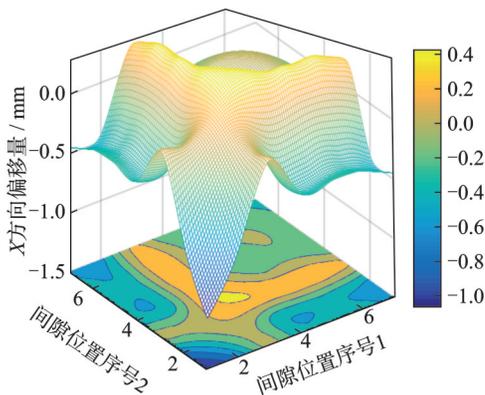
为方便观察间隙耦合情况下X和Z方向上的偏移情况,根据表2的计算结果绘制如图9和图10所示的偏移量等高线图。

由图9可知,间隙1、间隙2、间隙7三处位置的间隙两两耦合后对于X方向上造成的负向偏移影响明显增大;间隙3处的结构间隙可能会对间隙1、间隙2、间隙7位置处的间隙偏移影响起到补偿作用,即间隙3位置处的结构间隙对于间隙1、间隙2、间隙7位置处在X方向上存在修正负向偏移的作用。

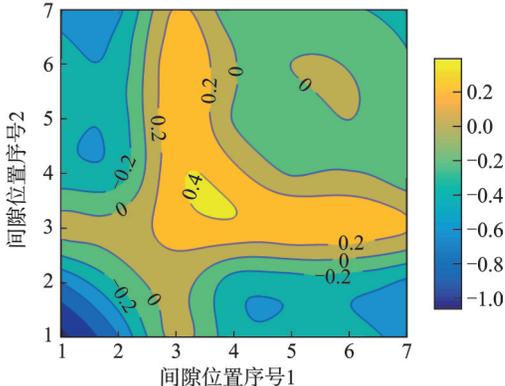
表 2 收放机构结构间隙耦合结果

Table 2 Results of coupling structural clearances of the retractable mechanism

间隙位置 1	间隙位置 2	X轴偏移量/ mm	Z轴偏移量/ mm
1	2	-0.598 0	-3.397 9
1	3	0.064 9	-3.715 3
1	4	-0.313 0	-2.303 3
1	5	-0.315 1	-2.284 9
1	6	-0.327 5	-2.161 9
1	7	-0.452 1	-3.577 2
2	3	0.074 2	-3.673 1
2	4	-0.303 9	-2.261 6
2	5	-0.306 0	-2.243 3
2	6	-0.319 2	-2.124 0
2	7	-0.442 9	-3.535 3
3	4	0.358 6	-2.579 4
3	5	0.356 2	-2.559 7
3	6	0.344 5	-2.447 8
3	7	0.220 0	-3.855 9
4	5	-0.019 0	-1.151 4
4	6	0.015 0	-1.461 4
4	7	-0.154 9	-2.454 4
5	6	0.002 1	-1.412 2
5	7	-0.156 8	-2.437 1
6	7	-0.170 8	-2.312 0



(a) Three-dimensional graph of X-directional displacement with respect to changes in coupling clearance

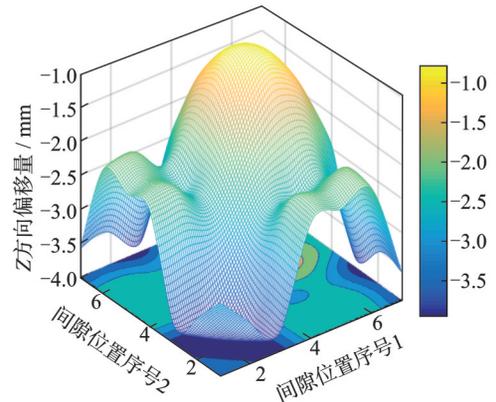


(b) X-direction offset varies with the coupling clearance change in the projection image

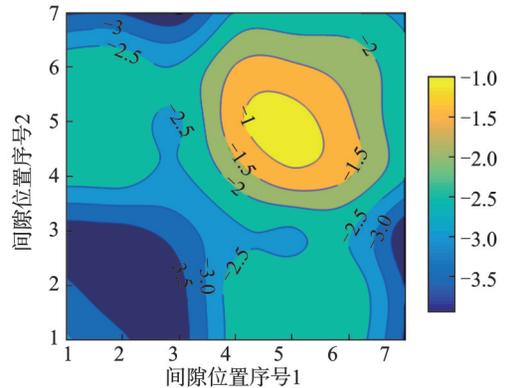
图 9 间隙耦合情况下 X 轴方向上的偏移量变化

Fig.9 Variation of displacement in the X-axis direction under clearance coupling condition

由图 10 可知,间隙 1、间隙 2、间隙 7 三处位置的间隙两两耦合后在 Z 方向上产生的负向偏移影响明显增大;间隙 3 位置处的结构间隙可能会对间隙 1、间隙 2、间隙 7 位置处的间隙偏移影响起到增强作用,即间隙 3 位置处的结构间隙对于间隙 1、间隙 2、间隙 7 位置处在 Z 方向上存在增大负向偏移的作用;间隙 4、间隙 5、间隙 6 三处位置的间隙两两耦合后对于 Z 方向上造成的负向偏移影响较为明显。



(a) Three-dimensional graph of Z-directional displacement with respect to changes in coupling clearance



(b) Z-direction offset varies with the coupling clearance change in the projection image

图 10 间隙耦合情况下 Z 轴方向上的偏移量变化

Fig.10 Variation of displacement in the Z-axis direction under clearance coupling condition

2 基于自适应 Kriging 的可靠性分析方法

2.1 Kriging 模型

工程应用中,自变量与响应量之间往往没有明确的数学表达式,即极限状态函数不可显,同时对于小失效概率情况,如果利用蒙特卡洛方法计算,获取精确解需要巨大的计算量^[17-20],因此在分析此类可靠性问题时使用代理模型尤为重要。

Kriging 代理模型是一种基于已知样本点信息的空间插值技术^[17,21-25],预测值可以表示为回归模型 $F(\beta, x)$ 和随机过程 $z(x)$ 之和,即

$y(x) = F(\beta, x) + z(x) = f(x)\beta + z(x)$ (1)
 式中： $y(x)$ 表示响应函数； $f(x)$ 表示多项式； β 表示多项式系数； $z(x)$ 表示函数随机分布部分。

不同样本点预测值之间的协方差矩阵定义为

$$\text{Cov}[z(x_i), z(x_j)] = \sigma_z^2 R(x_i, x_j, \theta) \quad (2)$$

式中： σ_z 表示方差； x_i, x_j 表示测试样本点； θ 表示模型参数； $R(x_i, x_j, \theta)$ 表示任意两个样本点 x_i, x_j 之间的相关函数，不同样本点之间的高斯型相关函数为

$$R(x_i, x_j, \theta) = e^{\left(-\sum_{k=1}^n \theta^k (x_j^k - x_i^k)^2\right)} \quad (3)$$

式中： n 为随机变量的维度，表示 k 维分量。模型参数 θ 与 σ_z^2 可以通过极大似然估计法得到。

则Kriging代理模型在预测点集的均值(响应值)和方差为

$$\mu_{\hat{G}}(x) = f(x)^T \beta^* + r(x)^T R^{-1}(Y - F\beta^*) \quad (4)$$

$$\sigma_{\hat{G}}^2(x) = \sigma_z^2 (1 + u^T (F^T R^{-1} F)^{-1} u - r(x)^T R^{-1} r(x)) \quad (5)$$

式中： $r = [R(x_1, x), R(x_2, x), \dots, R(x_m, x)]$ ，表示预测样本点集与训练样本点集之间的相关系数， x 为除实验设计点外的样本点； $u = F^T R^{-1} r(x) - f(x)$ 。

2.2 基于改进Kriging的可靠性分析方法

传统的自适应Kriging模型结合Monte Carlo法(Adaptive Kriging model combined with Monte Carlo method, AK-MC)搜寻的最佳样本点具有预测值的绝对值较小或者标准差较大的特点^[19, 26-29]。然而这些最佳样本点中可能包含位于变量空间的边缘区域(即概率密度函数值较小)的样本点，它们不仅对失效概率的求解精度影响不大，还会增加可靠性分析过程中调用功能函数的次数，降低可靠性分析的效率。

因此为避开设计空间中概率密度函数值较小的区域，通过考虑各变量的概率密度函数，得到新的自适应学习函数与最佳样本点选择策略

$$U_{\text{new}} = \frac{U(x)}{f(x)} = \frac{|\mu_g(x)|}{\sigma_g(x) \prod_{i=1}^n f_i(x_i)} \quad (6)$$

$$x_{\text{best}} = \arg \min U_{\text{new}} \quad (7)$$

同时确定Kriging代理模型的收敛条件为

$$E = |S - S'|/S' \leq 5e - 4 \text{ 或 } U_{\text{new}_{\text{min}}}(x) \geq 2 \quad (8)$$

式中： S 代表当前最大的标准差； S' 代表更新Kriging代理模型前，即上一次未新增样本点的最大标准差。

根据大数定律，当 N 趋于无穷大时，样本频率依概率收敛于真实概率。用Monte Carlo法(MC)进行失效概率计算时，利用变异系数(Coefficient

of variation, COV)来表达估计的误差，可以检验 N 是否满足要求。

$$\text{COV} = \sqrt{\frac{1 - P_f}{(N - 1)P_f}} \quad (9)$$

本文基于改进的Kriging模型，对起落架收放机构进行可靠性分析，方法流程如图11所示。具体步骤包括以下6步。

(1)定义初始样本点与测试样本集。在设计空间内利用拉丁超立方抽样产生少量样本点，得到训练样本集 $\{T\}$ ，计算各样本点对应的真实响应值，得到响应值集 $\{G\} = G(T)$ 。同时，在设计空间内产生 N_{mc} 个服从分布函数的样本点集 $S = \{X_i\}, i = 1, 2, \dots, N_{\text{mc}}$ 。

(2)构建初始Kriging模型。根据步骤1中得到的 $\{T\}$ 以及 $\{G\} = G(T)$ ，拟合建立初始Kriging模型，计算测试样本集 S 的预测响应值与预测标准差。

(3)判断学习停止准则。利用式(7)选择最佳样本点 X_{best} ，并计算其真实响应值 $G(X_{\text{best}})$ ，依据式(8)判断此时的代理模型是否达到停止更新拟合的准则，如果满足学习停止准则，则转到步骤5，反之，则转到步骤4。

$$(4) \text{ 令 } \begin{cases} \{T\} = \{T\} \cup \{X_{\text{best}}\} \\ \{G\} = \{G\} \cup \{G(X_{\text{best}})\} \end{cases} \text{ 然后转到步骤2重新拟合Kriging模型。}$$

(5)根据式(9)，计算此时MC失效概率的变异系数，如果其小于0.1，则认为此时满足样本点的学习停止准则，转到步骤6；反之，继续补充扩大测试样本集 S ，转到步骤2重新预测样本点集 S 的响应。

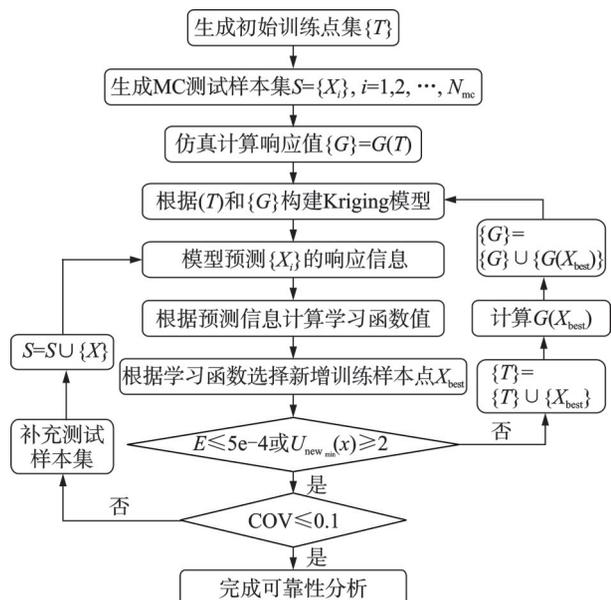


图11 改进Kriging模型构建方法流程图

Fig.11 Flowchart construction method for the improved Kriging model

(6)算法结束,完成机构的可靠性分析。

2.3 算例验证

为了证明本文算法的有效性,通过不同的数学算例对改进后的学习函数进行验证,以下是运用改进 Kriging 模型进行可靠性计算分析的数学模型实例。

(1)数值算例 1

算例 1 的各变量均服从正态分布且相互独立,参数值如表 3 所示,其功能函数为 $g = x_1 + 2x_2 - 8$ 。

不同方法的计算结果如表 4 所示。

表 3 算例 1 变量参数

Table 3 Variable parameters of example 1

分布参数	均值	标准差
x_1	5	0.5
x_2	2	0.2

表 4 算例 1 不同方法计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results using different methods for example 1

可靠性分析 方法	模型调用 (迭代)次数	失效概率 (变异系数)	时间/s	相对误差/ %
直接抽样 MC	1e6	0.059 287 (0.003 98)	0.05	—
AK-MC	16+8	0.059 192 (0.005 64)	16.503	0.16
改进 AK-MC	16+3	0.059 262 (0.005 63)	4.31	0.042

(2)数值算例 2

算例 2 的各变量均服从正态分布且相互独立,参数值如表 5 所示,其功能函数为 $g = 0.025 - \frac{x_1 x_2^2}{2} \left(\frac{3.81}{x_4 x_6} + \frac{1.13}{x_3 x_5} \right)$ 。

不同方法的计算结果如表 6 所示。

由表 4 和表 6 可以得出:综合考虑模型调用次数、计算时间以及相对误差等方面,相较于直接抽样 MC 方法与 AK-MC 方法,改进的 Kriging 代理模型很好地平衡了计算精度与计算效率之间的矛盾,相对减少了模型调用的次数与计算时间,在计算效率相对提高的同时保证了较高的计算精度。

3 收放机构运动精度可靠性分析

3.1 考虑磨损间隙的可靠性模型

前起落架收放机构采用液压作动筒作为动力元件,收放机构由悬挂摇臂、阻力撑杆、支柱、折叠撑杆组成,锁定机构采用钩环锁。

表 5 算例 2 变量参数

Table 5 Variable parameters of example 2

分布参数	均值	标准差
x_1	2e4	0.08
x_2	12	0.02
x_3	9.82e-4	0.06
x_4	0.04	0.20
x_5	1.2e11	0.07
x_6	3e10	0.08

表 6 算例 2 不同方法计算结果对比

Table 6 Comparison of calculation results using different methods for example 2

可靠性分 析方法	模型调用 (迭代)次数	失效概率 (变异系数)	时间/s	相对误 差/%
直接抽样 MC	1e6	0.012 523 (0.008 9)	0.174	—
AK-MC	16+152	0.012 464 (0.012 59)	1 418.74	0.47
改进 AK-MC	16+66	0.012 59 (0.012 52)	191.271	0.54

前起落架收放机构的可靠性问题在仿真计算中主要考虑机构无法收上到上锁位置,其可靠性主要受结构间隙以及磨损的影响。因此,将前起落架收放机构的失效判据定为在收上位置时,钩环锁机构的锁柱和锁钩的空间距离,其判据方程为

$$g(x) = \Delta^* - \Delta(x) \quad (10)$$

式中: $g(x)$ 表示功能函数; Δ^* 表示锁机构的极限上锁距离; $\Delta(x)$ 表示锁柱与锁钩的实际上锁距离。

由于稳定磨损阶段更符合机构的实际工作状态,因此针对稳定磨损阶段,研究收放机构的磨损量随收放次数引起的间隙增加问题,以此对收放机构的可靠性进行评估。

Archard 磨损模型^[9,11,15,30-31]在实际计算磨损量时被广泛采用,其表达式为

$$\frac{V}{L} = K \frac{F}{H} \quad (11)$$

式中: V 表示磨损体积, L 表示运动副相对滑动距离, K 表示磨损系数, F 表示运动副间的法向载荷, H 表示材料的布氏硬度。

根据磨损体积量 V 的物理表达

$$V = \left[\pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2 \right] b = \pi b (\Delta r^2 + 2r\Delta r) \quad (12)$$

式中: Δr 为销轴/孔的半径变化量(即磨损深度), r 为轴销半径, b 为接触长度。由于半径磨损量往往很小,因此式(12)可以近似表示为

$$V = 2\pi r \Delta r b \tag{13}$$

由弧长公式可知

$$L = 2r\alpha^* n \tag{14}$$

式中： n 表示起落架收放运动的循环次数， α^* 表示机构一次收上/放下运动中销轴与衬套的相对转角。

综合考虑式(11)至式(14)可计算得到轴销和衬套的磨损深度值为

$$h = \Delta r = \frac{KF\alpha^*}{\pi bH} n \tag{15}$$

设收放机构的衬套孔径为 D_i ，轴销直径为 d_i ($i=1, 2, \dots, 7$)，则结构间隙可以表示为 $D_i - d_i$ 。由于装配初期时销轴和衬套之间也会存在一定的间隙，因此使用正态分布来描述这种初始间隙的不确定性分布情况。

综上所述，建立考虑间隙磨损和初始间隙不确定性的磨损量计算方法为

$$U_i = \left(\frac{N(\mu_{D_i}, \sigma_{D_i}^2) - N(\mu_{d_i}, \sigma_{d_i}^2)}{2} \right) + \frac{KF\alpha^*}{\pi bH} n \tag{16}$$

由于收放机构在不同工况下的响应值存在不确定性，同时机构的临界上锁位置在测量时也存在误差，因此使用正态分布来描述这种临界上锁位置的不确定性分布情况。

得到综合考虑机构初始间隙不确定性、磨损以及临界上锁位置不确定性的起落架收放机构可靠性模型为

$$R = 1 - P_f = 1 -$$

$$\sum_{i=1}^N \left\{ N(\mu_{\Delta}, \sigma_{\Delta}^2) - \Delta \left(\frac{N(\mu_{D_i}, \sigma_{D_i}^2) - N(\mu_{d_i}, \sigma_{d_i}^2)}{2} + \frac{KF\alpha^*}{\pi bH} n \right) < 0 \right\} / N \tag{17}$$

3.2 机构可靠性分析

(1) Kriging 模型训练

采用 Kriging 代理模型与 MC 结合的方式进行可靠性分析计算。

在可靠性分析计算中需要使用联合仿真模型，其由虚拟样机和可靠性计算方法组合而成，利用 CAD 等仿真软件建立虚拟样机模型，然后使用数值计算软件 MATLAB 进行数据处理，同时，通过接口插件文件实现 MATLAB 与虚拟样机之间的数据交互，如图 12 所示。

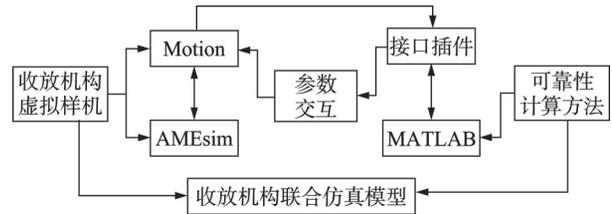


图 12 联合仿真模型框架

Fig.12 Framework of unified simulation model

对于隐式极限状态函数，需要通过有限元仿真分析得到初始样本数据的真实响应值；然后完成代理模型的初始建立，接着通过联合仿真模型，不断更新代理模型以达到精度要求；最后进行概率分析，通过 MC 模拟计算得到机构的可靠度，完成机构的运动精度可靠性分析。具体步骤如图 13 所示。

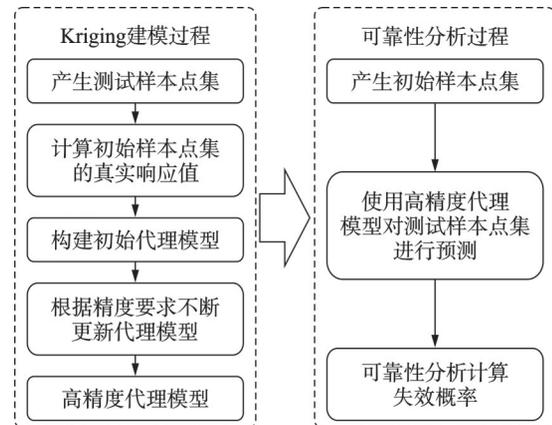


图 13 机构可靠性分析流程图

Fig.13 Flowchart of mechanism reliability analysis

根据改进的学习机制对 Kriging 模型进行训练拟合，通过编写校验程序检验 Kriging 模型的拟合效果是否满足预期的要求，如图 14 所示。真实值为仿真模型根据前起落架收放机构的参数值获得的锁钩上锁距离，预测值为 Kriging 模型根据前落架收放机构的参数值获得的锁钩上锁距离。

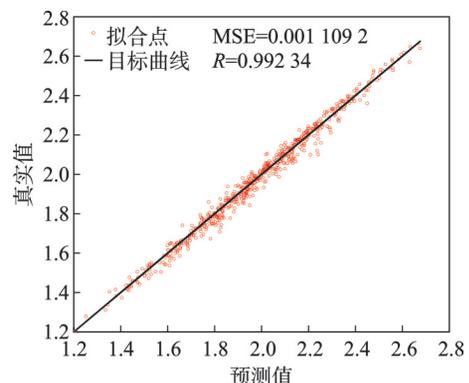


图 14 Kriging 模型训练效果图

Fig.14 Graph of the training effect of Kriging model

可以看到真实值和预测值之间有略微误差,但是在可接受范围内,且计算得到的均方误差为 0.001 1。综合真实值和预测值的关系以及均方误差值,可以合理认为 Kriging 模型训练完毕。

(2)机构可靠性分析

间隙 1~7 作为变量均服从正态分布(间隙 $i \sim N(\mu_{U_i}, \sigma_{U_i}), i = 1, 2, \dots, 7$),通过考虑临界上锁位置、初始间隙以及磨损等不确定性因素的影响,依据此变量分布形式,可以生成蒙特卡洛方法的样本空间。

通过回归模型对此样本空间的输出结果进行映射,分别得到如图 15 和图 16 所示的偏移响应量直方图。同时,由回归模型对收放机构的运动可靠性进行预计,得到如图 17 和图 18 所示的机构运动失效概率随收放次数的变化曲线。

如图 15 所示,在机构的收放次数为 0 时,即未经历收放磨损的情况下,由于装配等因素的影响,机构存在着一定的初始间隙和偏差,通过蒙特卡洛法生成的样本空间、代理模型计算预测其相应的响应值,此时机构的偏移响应量约为 1.6 mm,主要集中在 1.3~1.9 mm。

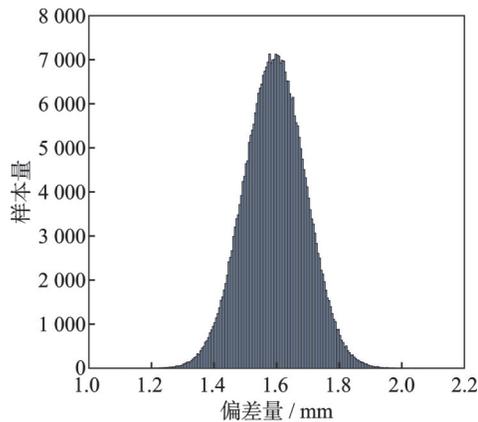


图 15 0 次收放时的偏移响应量

Fig.15 Offset response quantity at 0 cycle of retracting motion

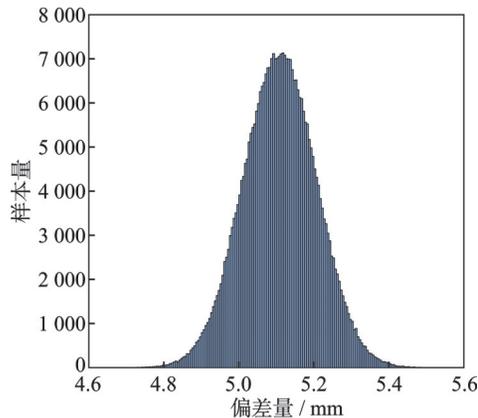


图 16 30 000 次收放时的偏移响应量

Fig.16 Offset response quantity at 30 000 cycles of retracting motion

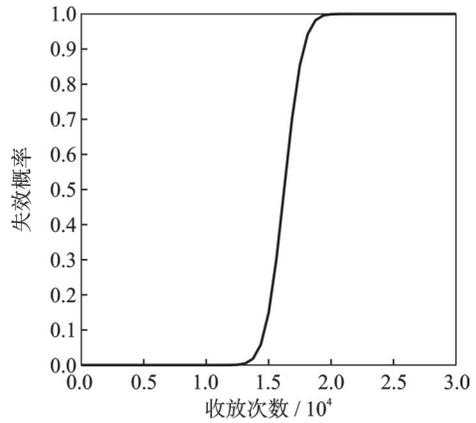


图 17 0~30 000 次收放失效概率变化曲线

Fig.17 Probability of failure from 0 to 30 000 cycles of retracting motion

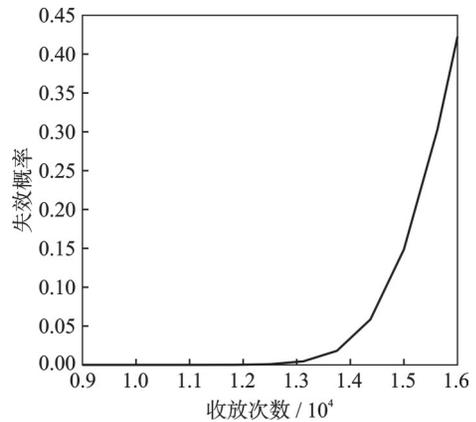


图 18 9 000~16 000 次收放失效概率变化曲线

Fig.18 Probability of failure from 9 000 cycles to 16 000 cycles of retracting motion

对比图 15 和图 16 可知,起落架的收放次数较少时,机构的偏移响应量较小,但随着收放次数的增加,机构的偏移响应量逐渐增大,这反映了随着收放次数的增加,机构关节之间的磨损逐渐加重,导致关节间隙逐渐变大,同时,机构多个关节位置的结构间隙之间存在耦合影响,各结构间隙在经过碰撞、磨损后,产生的变化程度不同,导致机构的运动轨迹及承载特性发生改变,从而导致机构出现实际上锁距离大于极限上锁距离的概率增大,最终加剧收放机构运动精度的下降。

如图 17、18 所示,当起落架的收放次数较少时,由于各关节处的磨损量都比较小,机构收放次数位于 0~120 00 次时,机构的失效概率一直保持在小于 $1e-5$ 的水平,此时机构具有较高的可靠性。由于各关节在起落架收放时会发生转动,随着机构不断进行收放运动,各关节转动较为频繁,就会加剧磨损,从而导致各个关节位置处的磨损量逐渐增加,进而导致在收上位置时,钩环锁机构的锁柱和锁钩之间的空间距离偏差逐渐增大,收放机构

无法精确地收到上锁位置,因此导致机构的运动失效概率迅速上升,在机构完成 16 000 次收放运动时,运动失效概率达到了 0.43。

因此,在实际应用中通过降低磨损量可以有效降低收放机构因精度不足导致的上锁失败情况。

(3)机构可靠性影响因素分析

选取间隙均值 0.05~0.5 mm 的 16 个工况,间隙方差 0.01~0.1 mm² 的 11 个工况,经过随机抽样得到可靠性分析结果分别如图 19 和图 20 所示。

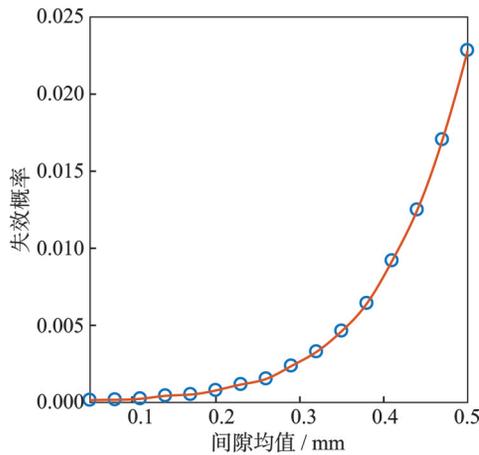


图 19 间隙均值对失效概率的影响

Fig.19 Impact of the mean clearances on failure probability

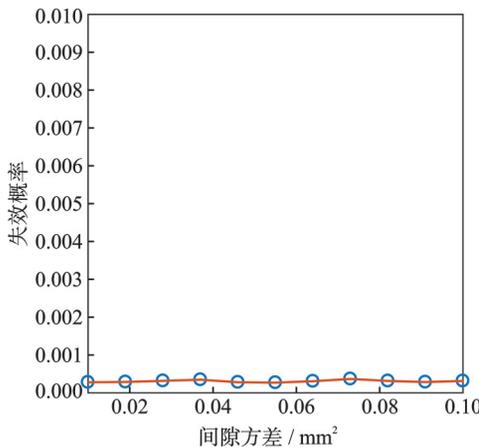


图 20 间隙方差对失效概率的影响

Fig.20 Impact of variance of clearances on failure probability

间隙均值与前起落架收放机构的失效概率呈正相关关系,综合考虑经济性和安全性的情况下,间隙均值不应大于 0.2 mm,如果间隙均值大于 0.2 mm,失效概率将会随间隙均值的增加而快速增长。

相较于间隙均值,间隙方差对前起落架收放机构的失效概率影响不大,基本不能改变前起落架收放机构的失效概率。

以上内容分析了间隙整体的均值与方差变化对机构失效概率的影响,接下来通过只改变机构某

一处结构间隙的均值与方差,单独分析其对于收放机构运动可靠性的影响。

结构间隙 1~7 作为变量均服从正态分布,其均值分布范围为 0.05~0.5 mm,方差分布范围为 0.01~0.1 mm²。

结构间隙取不同的均值与方差时,机构失效概率的变化情况分别如图 21、22 所示。

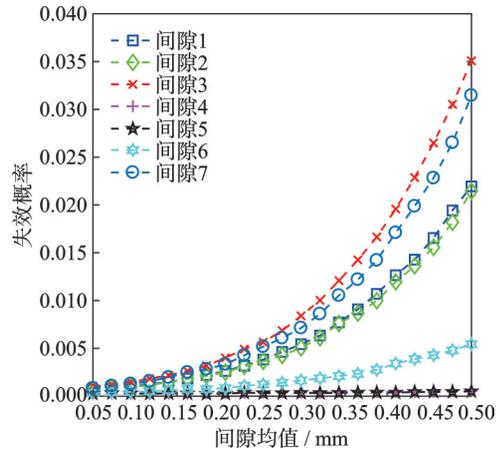


图 21 7 处位置的间隙均值对失效概率的影响

Fig.21 Impact of mean clearances at seven locations on failure probability

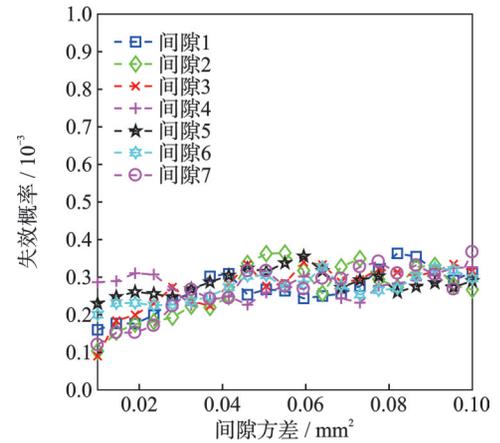


图 22 7 处位置的间隙方差对失效概率的影响

Fig.22 Impact of variance of clearances at the seven locations on failure probability

7 处位置的间隙均值与前起落架收放机构的失效概率呈现正相关趋势,即 7 处间隙位置的均值增大会造成收放机构的运动失效概率增大,从而导致机构可靠性水平下降。相较于间隙 4、间隙 5、间隙 6 位置,间隙 1、间隙 2、间隙 3、间隙 7 位置处的间隙均值变化对收放机构的失效概率影响更大,可能的原因是由于主支柱在占用较小收放轨迹空间的同时需要保证精确地收回起落架舱段,造成主支柱所受到的地面载荷振动等不能直接传递至机身而是需要通过杆系的间接传递。

相比之下,7 处间隙位置的方差变化对收放机

构失效概率影响不显著。因此,在生产、装配和使用过程中由于制造人员、制造工艺、生产环境、使用环境以及使用时间等变化所导致某个间隙的方差产生变化,并不会导致失效概率产生明显变化。

因此,将间隙1、间隙2、间隙3、间隙7位置处的间隙均值控制在0.15 mm左右,方差控制在 0.04 mm^2 左右,将间隙4、间隙5、间隙6位置处的均值控制在0.2 mm左右,通过3.1节中建立的考虑磨损间隙的可靠性模型,计算可知此时收放机构的运动精度可靠度不小于0.999 904,该计算结果可以为起落架的可靠性设计提供参考。

在实际使用过程中,通过定期检修等方式了解起落架收放机构中零部件的间隙磨损状况,通过及时维护降低由于结构间隙造成的可靠性降低问题。

4 结 论

(1) 对结构间隙变化的单因素影响与耦合影响进行了分析:间隙3位置处的间隙对X方向偏移影响最大,且造成X方向上出现正向偏移;间隙3位置处的结构间隙对于间隙1、间隙2、间隙7位置处在X方向上存在修正负向偏移的作用;间隙1、间隙2、间隙3、间隙7四处位置的间隙对Z方向偏移影响最明显,且间隙3位置处的影响最大;间隙3位置处的结构间隙对于间隙1、间隙2、间隙7位置处在Z方向上具有增大负向偏移的效果。

(2) 建立了考虑磨损间隙的可靠性模型,运用Kriging代理模型结合MC对起落架收放机构进行了可靠性分析:0~12 000次收放过程中机构的失效概率始终处于较低水平,但随着收放次数的不断增加,在各个位置磨损量增大的共同作用下收放机构的运动失效概率迅速上升。

(3) 对结构间隙的分布参数影响进行了分析:间隙1、间隙2、间隙3、间隙7位置处的间隙均值变化对收放机构的失效概率影响更大,7处间隙位置的方差变化对收放机构失效概率影响不显著。将间隙1、间隙2、间隙3、间隙7位置处的间隙均值控制在0.15 mm左右,方差控制在 0.04 mm^2 左右,将间隙4、间隙5、间隙6位置处的均值控制在0.2 mm左右,可以有效控制收放机构的运动精度可靠性。

参考文献:

[1] TSB. Statistical summary: air transportation occurrences in 2021[R].[S.l.]: Transportation Safety Board of Canada, 2021.

[2] 王钰龙,魏小辉,印寅,等.某起落架收放试验故障分析及间隙影响分析[J].机械科学与技术,2015,34

(2): 325-328.

WANG Yulong, WEI Xiaohui, YIN Yin, et al. Failure analysis and gap impact analysis of a landing gear's extension-retraction test[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(2): 325-328.

[3] 印寅,聂宏,魏小辉,等.多因素影响下的起落架收放系统性能分析[J].北京航空航天大学学报,2015,41(5): 953-960.

YIN Yin, NIE Hong, WEI Xiaohui, et al. Retraction system performance analysis of landing gear with the influence of multiple factors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(5): 953-960.

[4] 陈放,李欣玲,余霞,等.含运动副间隙平面轨迹机构的可靠性设计[J].机械科学与技术,2017,36(6): 863-868.

CHEN Fang, LI Xinling, SHE Xia, et al. Reliability design of planar path mechanism with joint clearance [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(6): 863-868.

[5] 印寅.起落架收放动力学及可靠性研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.

YIN Yin. Study on dynamics and reliability of landing gear retraction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[6] CHEN X L, GAO S. Dynamic response and dynamic accuracy reliability of planar mechanism with multiple lubricated clearances[J]. Multibody System Dynamics, 2023, 57(1): 1-23.

[7] 杨逸波,汪满新.R(RPS&RP)-2-UPS并联机构位置精度可靠性建模与分析[J].机械工程学报,2023,59(15): 62-72.

YANG Yibo, WANG Manxin. Reliability modeling and analysis of position accuracy of R (RP S&RP)-2-UPS parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(15): 62-72.

[8] SHI Y, SONG B F, YU T X, et al. Kinetic reliability analysis of space four-links mechanism considering wear[C]//Proceeding of 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Bali: IEEE, 2016: 1350-1354.

[9] 周姿言,赵全越,王珊珊,等.铰链有磨损时飞机舱门的运动可靠性研究[J].机械工程师,2019(2): 67-71.

ZHOU Ziyan, ZHAO Quanyue, WANG Shanshan, et al. Research on motion reliability of aircraft cabin doors with hinge wear[J]. Mechanical Engineer, 2019(2): 67-71.

[10] 周长聪,吉梦瑶,张屹尚,等.多失效模式下起落架机构可靠性及灵敏度研究[J].西北工业大学学报,

- 2021, 39(1): 46-54.
- ZHOU Changcong, JI Mengyao, ZHANG Yishang, et al. Mechanism reliability and sensitivity analysis of landing gear under multiple failure modes[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 46-54.
- [11] ZHUANG X C, YU T X, LIU J Y, et al. Kinematic reliability evaluation of high-precision planar mechanisms experiencing non-uniform wear in revolute joints [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 169: 108748.
- [12] 尹明德, 欧阳祖行, 武仿. 货舱门锁机构系统磨损可靠性分析和评估[J]. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(3): 300-305.
- YIN Mingde, OUYANG ZuXing, WU Fang. Analysis and evaluation of wear reliability of cargo hold door lock mechanism system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1995, 27(3): 300-305.
- [13] 潘柏松, 方宽, 文娟, 等. 考虑磨损与变形的谐波齿轮精度可靠性分析与优化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(2): 355-367.
- PAN Baisong, FANG Kuan, WEN Juan, et al. Accuracy reliability analysis and optimization design of harmonic gear considering wear and deformation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(2): 355-367.
- [14] LI D H, ZHOU X, LING S Q, et al. Prediction of operating reliability of multi-body mechanism in micro-switches considering parameter distribution and wear of parts[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(7): 3399-3407.
- [15] QIAN W X, SONG S, ZHAO J H, et al. A study of the effect of a kinematic pair containing clearance on the dynamic characteristics of a tool-changing robot [J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 11041.
- [16] 高顺, 陈修龙. 含磨损间隙多连杆机构动力学特性与动态精度可靠性分析[J]. 计算机集成制造系统, 2023: 1-16, <http://kns.cnk.net/kcms2/detail/11.5946.TP.20230725.1830.002.html>.
- GAO Shun, CHEN Xiulong. Analysis of the dynamic characteristics and dynamic accuracy reliability of a multi-link mechanism with wear clearances[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023: 1-16, <http://kns.cnk.net/kcms2/detail/11.5946.TP.20230725.1830.002.html>.
- [17] 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 Zhonghua. 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.
- [18] CHENG K, LU Z Z. Structural reliability analysis based on ensemble learning of surrogate models[J]. Structural Safety, 2020, 83: 101905.
- [19] LI W Z, YANG R G, QI Q S, et al. A novel structural reliability method based on active Kriging and weighted sampling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(6): 2459-2469.
- [20] 张永利, 吕震宙, 李生兰. 可靠性及可靠性灵敏度分析的改进点估计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 705-713.
- ZHANG Yongli, LV Zhenzhou, LI Shenglan. Improved point estimation method for analyzing reliability and reliability sensitivity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 705-713.
- [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.
- YU Zhenzhou, SONG Shufang, LI Luyi, et al. Fundamentals of structure/mechanism reliability design [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2019.
- [22] REN C, AOUES Y, LEMOSSE D, et al. Ensemble of surrogates combining Kriging and artificial neural networks for reliability analysis with local goodness measurement[J]. Structural Safety, 2022, 96: 102186.
- [23] ZHOU C N, XIAO N C, ZUO M J, et al. AK-PDF: An active learning method combining Kriging and probability density function for efficient reliability analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2020, 234(3): 536-549.
- [24] 郭琪磊, 杜杰, 张恒. 基于POD和Kriging的水滴收集量快速预测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(2): 318-326.
- GUO Qilei, DU Jie, ZHANG Heng. Rapid prediction of droplet mass caught based on POD and Kriging[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(2): 318-326.
- [25] LI Tingyu, REN Jinghao, WANG Qiang, et al. Fast calculation of icing cloud parameters based on POD—Kriging surrogate model[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 40(S1): 1-12.
- [26] YOU X X, ZHANG M Y, TANG D Y, et al. An active learning method combining adaptive Kriging and weighted penalty for structural reliability analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2022, 236(1): 160-172.

- [27] ZHANG X F, WANG L, SØRENSEN J D. REIF: A novel active-learning function toward adaptive Kriging surrogate models for structural reliability analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 185: 440-454.
- [28] 赵立杰, 卜尚文. 结合 Kriging 模型 U 权重学习函数结构可靠性研究 [J]. 航空计算技术, 2022, 52(2): 17-21.
ZHAO Lijie, BU Shangwen. Structural reliability study combining the Kriging model and the weight learning function [J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(2): 17-21.
- [29] 曹汝男, 孙志礼, 郭凡逸, 等. 基于 Kriging 和 Monte Carlo 的动态可靠性算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 658-664.
CAO Runan, SUN Zhili, GUO Fanyi, et al. Time-dependent reliability algorithm based on Kriging and Monte Carlo [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(5): 658-664.
- [30] ZHUANG X C, YU T X, SHEN L J, et al. Time-varying dependence research on wear of revolute joints and reliability evaluation of a lock mechanism [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 543-561.
- [31] 喻天翔, 庄新臣, 宋笔锋, 等. 飞机连杆机构多铰链磨损寿命综合预测方法 [J]. 航空学报, 2022, 43(8): 625113.
YU Tianxiang, ZHUANG Xinchen, SONG Bifeng, et al. Integrated wear life prediction method of multiple joints in an aircraft linkage mechanism [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(8): 625113.

(编辑:夏道家)