

基于多体仿真模型的运动机构可靠性 仿真试验系统研究

王 慧, 宋笔锋, 喻天翔

(西北工业大学航空学院, 西安 710072)

摘 要: 以蒙特卡罗法为理论核心, 利用多体运动学和动力学分析软件——LMS Virtual. Lab 作为运动机构可靠性分析平台, 通过 Visual Basic . NET 程序设计语言建立用户界面并实现对 LMS Virtual. Lab 的调用, 以进行运动机构的可靠性仿真试验, 采用得到的随机变量数据库和结果数据库对运动机构进行典型失效模式的可靠性分析, 从而形成了一套可以实现运动机构的可靠性仿真与分析功能的可靠性仿真试验系统。以对心曲柄滑块机构为例, 进行了几何尺寸误差和运动副间隙误差影响下的机构运动精度可靠性分析; 以某锁机构为例, 研究多失效模式下动力学特性对于机构定位可靠性的影响并进行了灵敏性分析。通过这两个实例验证该可靠性仿真试验系统进行机构可靠性仿真试验和可靠性分析的可行性和有效性。

关键词: 机构; 可靠性; 蒙特卡罗方法; 计算机仿真; 动力学模型

中图分类号: V211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2011)05-1005-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.05.007

Investigation on Experimental Simulation System for Mechanism Motion Reliability Based on the Multibody Simulation Model

WANG Hui, SONG Bi-feng, YU Tian-xiang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the Monte Carlo simulation, a hybrid experimental simulation system for mechanism motion reliability is developed by using the LMS Virtual. Lab and the Visual Basic . NET. In the hybrid simulative experiment system, the LMS Virtual. Lab is used to perform the kinematic and dynamic analysis; the Visual Basic . NET is used to develop the user interface and build the uncertainty models used for reliability analysis, as well as extract the useful result data from the output file of LMS Virtual. Lab. Finally, two examples, i. e. the mechanism motion reliability analysis of a crank-slider mechanism in which geometry errors and joint clearance errors are considered, and the multi-failure mode reliability analysis and sensitivity analysis of a lock mechanism in which the effect of dynamic characteristics on the reliability are considered, are adopted to illustrate feasibility and efficiency of the hybrid simulation system.

Key words: Mechanisms; Reliability; Monte carlo methods; Computer simulation; Dynamic models

0 引 言

运动机构可靠性侧重于研究机构系统(或运动副)在规定的条件下和规定的时间内,完成预定运动功能(轨迹、速度、精度、性态等)的能力。由于机

构可靠性问题所牵扯的方面诸多,包含了机构运动可靠性、机构动力学可靠性和机构系统可靠性的内容,使得机构可靠性研究较结构可靠性研究复杂,必须综合运用机构运动学、机构动力学、机构精度学、摩擦磨损原理及可靠性工程等学科的相关理论,进

行多学科的协同分析^[1]。

针对简单运动机构,一些学者通过误差线性叠加原理^[2]、误差传递的随机过程^[3-4]推导机构的输出运动方程或是动力学响应方程,结合蒙特卡罗法、神经网络法等经典可靠性分析方法来进行机构运动精度可靠性分析或是动力学可靠性分析。然而,工程实际运动机构系统构造复杂,包含接触碰撞^[5-7]、刚柔耦合^[8-9]等一系列非线性时变因素,失效机理众多、失效模式相关且失效概率较低,导致其运动过程的动态响应模型很难提取,一些经典可靠性分析方法由于很大程度上受低维和显式极限状态方程的约束也很难满足复杂运动机构可靠性分析的要求^[10]。那么,以工程应用为目标的复杂机构可靠性分析与评估需要借助机构可靠性分析的数字仿真技术和相应的软件工具,进行专项技术和软件工具的协同和综合^[1,11-13]。如张建国和苏多^[11]使用 ADAMS 软件中柔性多体动力学仿真功能,建立了由电机驱动力矩过大而引起的空间机构失效的功能函数,并使用响应面法获得了刚性结构以及柔性结构的失效概率。同样利用 ADAMS,纪玉杰等^[12]根据机构参数的分布类型,对曲柄滑块机构进行了多次蒙特卡罗随机分析,并根据输出参数的统计特性可获得其可靠度指标。因此,建立符合工程实际的机构运动学和动力学计算机仿真模型,通过仿真计算实现运动机构可靠性分析和评估,成为工程实际运动机构可靠性研究的必然发展趋势。

本文以解决机构可靠性工程实际问题为目标,以复杂运动机构工程化的可靠性分析以及运动学与动力学分析为基础,研究运动机构的计算机可靠性仿真技术,建立一种与计算机辅助设计、结构有限元分析以及多体动力学与运动学分析等商用软件进行联合仿真分析的可靠性仿真试验系统,通过仿真获得多种失效模式下的机构可靠性仿真试验结果数据库,最终实现运动机构的可靠性仿真综合分析,并为后续的可靠性优化与综合设计提供研究途径和数据支持。

1 系统框架及其实现过程

运动机构可靠性仿真试验系统的理论核心是以

随机抽样和统计试验为依据的蒙特卡罗方法。蒙特卡罗方法又称随机抽样技巧或统计试验方法,它能够比较逼真地描述事物的特点以及真实的物理试验过程,在一定意义上,可以部分代替物理实验,以此为基础进行复杂运动机构的可靠性仿真试验具有理论依据和可行性^[14]。以蒙特卡罗方法为依据的可靠性仿真试验与实物可靠性试验类似,都具有输入、仿真/试验、输出以及结果的后处理四个过程。仿真输入即进行运动机构可靠性试验前的试验条件与参数设置,反映运动机构各个元部件的结构特性以及所处的复杂的外载环境;当输入设置完成后,对设置的仿真参数进行随机抽样,进行多次仿真,可以再现不同条件下运动机构的实物可靠性试验过程;仿真结束后,根据运动机构典型失效模式提取每次仿真相应的结果数据,即获得了运动机构在不同条件的工作状况;最后,利用仿真试验得到的结果数据,并采用相关可靠性分析方法即可完成运动机构可靠性分析。

考虑计算机辅助设计软件 CATIA、结构有限元分析软件 Nastran 在航空航天领域的广泛应用,以及多体运动学和动力学分析软件 LMS Virtual. Lab 与 CATIA 以及 Nastran 的无缝连接,同时利用 Visual Basic . NET 程序设计语言所能提供的界面设计以及 Matlab 语言所能提供的数值计算功能,本可靠性仿真试验系统的总体思路为在 Visual Basic NET 环境下实现对 LMS Virtual. Lab 的二次开发,如图 1 所示。首先在 CATIA 以及 LMS Virtual. Lab 平台下实现运动机构确定性模型的建模与仿真;然后,通过 Visual Basic . NET 程序设计语言对 CATIA、LMS Virtual. Lab 以及 Matlab 进行调用,实现包括仿真输入、随机抽样、仿真运行、仿真输出等功能,同时建立 Access 数据库文件用于保存可靠性仿真试验的随机参数数据库和对应于典型失效模式的结果数据数据库;最后,利用数据库中得到的响应值对运动机构进行典型失效模式可靠性分析,从而形成一套可以实现运动机构可靠性仿真与分析功能的可靠性仿真试验系统。图 2 给出了运动机构可靠性仿真试验系统中,有关仿真输入、仿真运行、仿真输出以及结果后处理等完整的可靠性仿真分析流程。

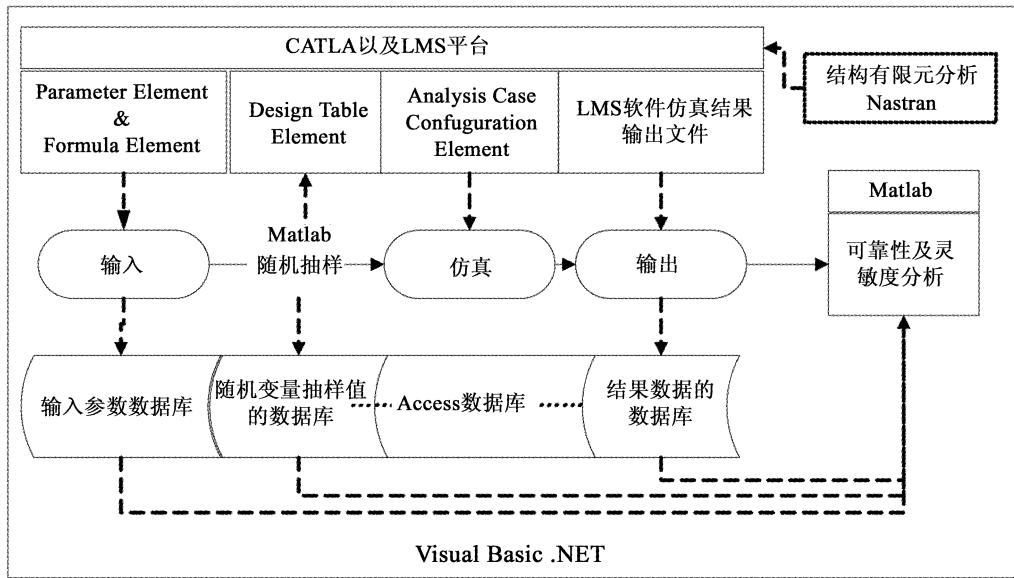


图 1 运动机构可靠性仿真试验系统的框架

Fig. 1 The framework of the simulative experiment system for mechanism motion reliability

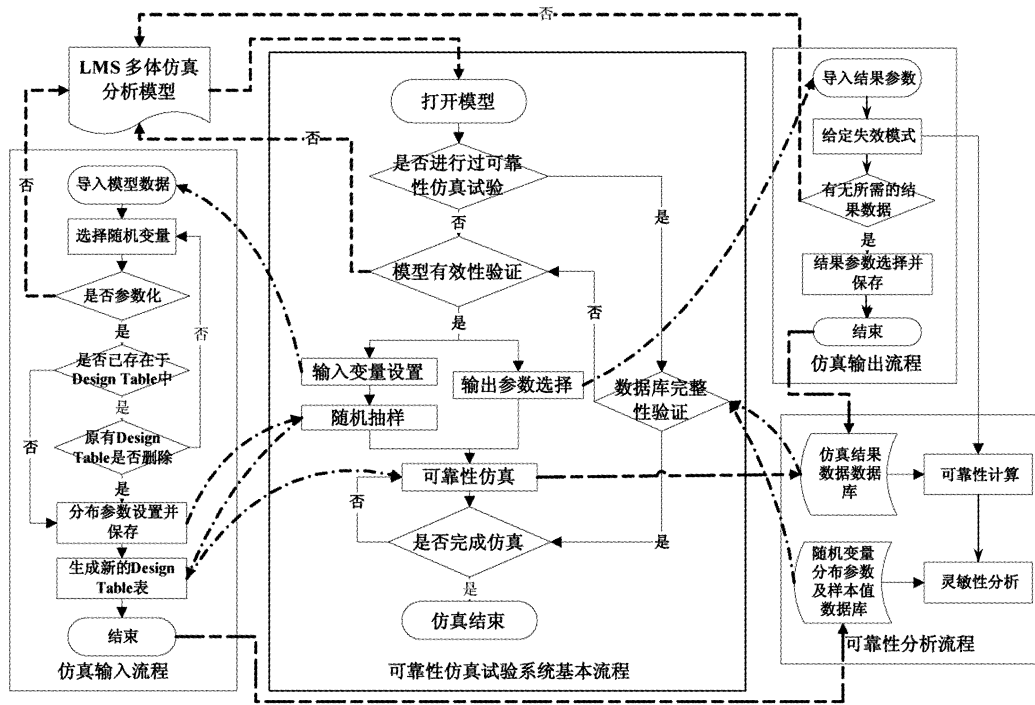


图 2 运动机构可靠性仿真试验分析流程

Fig. 2 The flowchart of the simulative experiment system for mechanism motion reliability

2 系统采用的可靠性与灵敏度分析方法

2.1 可靠性分析

采用蒙特卡罗方法进行可靠性分析,求解失效概率^[14-15]

$$\begin{aligned}
 P_f &= \int \cdots \int_{D_f} f_x(x) dx \\
 &= \int \cdots \int_R I_F[x] f_x(x) dx \\
 &= E\{I_F[x]\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, $f_x(x)$ 为基本随机变量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的

联合概率密度函数; D_f 表示失效域, 当系统为多失效模式时, D_f 表征系统失效域, 如系统含有 m 个失效模式且为串联时, 系统失效域为 $D_{f串} = \bigcup_{l=1}^m D_{fl}$, 如系统含有 m 个失效模式且为并联时, 系统失效域为 $D_{f并} = \bigcap_{l=1}^m D_{fl}$, 其中 $l = 1, 2, \dots, m$; $I_F[x]$ 为失效概率的指示函数,

$$I_F[x] = \begin{cases} 1, & x \in D_f \\ 0, & x \notin D_f \end{cases}$$

通过采用频率代替概率, 可以得到失效概率的估计值为

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_F[x_j] \quad (2)$$

其中, x_j 为按照联合概率密度函数 $f_X(x)$ 抽取的第 j 个样本点。

特别地, 对于单失效模式, 采用蒙特卡罗方法可以仿真得到某一关键结果参数 Z 的多个数据值, 则可以给定功能函数的简单形式, 如 $g(x) = Z - [Z]$ 。那么, 根据结果参数 Z 的多个数据值进行分布拟合并参数估计^[4], 通过 Kolmogorov 假设检验, 判断服从哪种分布类型, 继而可以通过求解该分布函数的累积分布函数值即 $P_f = P(Z < [Z])$ 得到失效概率。

2.2 可靠性灵敏度分析

采用蒙特卡罗方法进行可靠性灵敏度分析, 失效概率 P_f 对第 i 个变量的第 k 个分布参数 $\theta_k^{(i)}$ 的灵敏度可以转换成如下数学期望表示的形式^[15]

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_f}{\partial \theta_k^{(i)}} &= \int \dots \int_{D_f} \frac{\partial f_X(x)}{\partial \theta_k^{(i)}} dx \\ &= \int \dots \int_R I_F[x] \cdot \frac{\partial f_X(x)}{\partial \theta_k^{(i)}} \cdot \frac{1}{f_X(x)} \cdot f_X(x) dx \\ &= E \left\{ \frac{\partial f_X(x)}{\partial \theta_k^{(i)}} \cdot \frac{1}{f_X(x)} \cdot I_F[x] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

上式可采用样本均值来进行估计, 即第 i 个变量的第 k 个分布参数 $\theta_k^{(i)}$ 的灵敏度估计值为

$$\frac{\partial P_f}{\partial \theta_k^{(i)}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{I_F[x_j]}{f_X(x_j)} \cdot \frac{\partial f_X(x)}{\partial \theta_k^{(i)}} \Bigg|_{x=x_j} \quad (4)$$

假设基本随机变量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 相互独立, 其联合概率密度函数可以写为 $f_X(x) = f_{X_1}(x_1) \cdot f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n)$, 那么, 第 i 个变量的第 k 个分布参

数 $\theta_k^{(i)}$ 仅仅与第 i 个变量 x_i 的概率密度函数 $f_{X_i}(x_i)$ 相关, 则可靠性灵敏度计算公式可以进行如下推导

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_f}{\partial \theta_k^{(i)}} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{I_F[x_j]}{f_X(x_j)} \cdot \frac{f_X(x_j)}{f_{X_i}(x_{j,i})} \cdot \frac{\partial f_{X_i}(x_i)}{\partial \theta_k^{(i)}} \Bigg|_{x=x_j} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{I_F[x_j]}{f_{X_i}(x_{j,i})} \cdot \frac{\partial f_{X_i}(x_i)}{\partial \theta_k^{(i)}} \Bigg|_{x=x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $x_{j,i}$ 为从 $f_X(x)$ 中抽取的第 j 个样本中的第 i 个分量。

为便于对比各个随机变量分布参数的灵敏度, 对于上述计算得到的灵敏度进行归一化处理, 则第 i 个变量的第 k 个分布参数 $\theta_k^{(i)}$ 进行归一化后的灵敏度为

$$\omega_k^{(i)} = \frac{\partial P_f}{\partial \theta_k^{(i)}} / \left[\sum \left(\frac{\partial P_f}{\partial \theta_k^{(i)}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

3 算例

以两个运动机构, 即对心曲柄滑块机构和某舱门锁机构为例, 来验证该可靠性仿真试验系统的可行性及有效性。在曲柄滑块机构中考虑了机构的尺寸误差和运动副间隙, 进行机构运动精度可靠性分析; 在锁机构中考虑载荷特性变化的影响, 对于锁打开过程中的定位时间失效和驱动力矩不足失效问题进行多失效模式机构可靠性分析。

3.1 算例 1: 曲柄滑块机构

对心曲柄滑块机构中曲柄长度为 r_1 , 连杆长度 r_2 , 曲柄和连杆间的运动副间隙为 Δ_1 , 连杆和滑块间的运动副间隙 Δ_2 , 其误差分布类型及参数见表 1。曲柄的角速度为 60 转/分钟, 曲柄与地面初始夹角 $\alpha_0 = 45^\circ$ 。分别求曲柄转角 $\alpha = 90^\circ$ 和 $\alpha = 135^\circ$ 时滑块位移误差在 $\pm 3\text{mm}$ 之间的可靠度。

(1) 确定性模型的建立。依据问题描述, 在 LMS Virtual Lab 中建立曲柄滑块机构的确定性仿真模型, 见图 3。曲柄长度为 200mm, 连杆长度为 400mm, 均采用参数化设计。曲柄和地面采用了旋转副, 并给予一个铰链驱动, 曲柄的角速度为 60 转/分钟; 滑块与地面之间施加平移副; 为了能够进行运动精度可靠性仿真, 曲柄和连杆之间、连杆与滑块之间不采用传统的转动副约束, 采取了在曲柄端部进行挖孔并使用设计变量来参数化孔的半径, 而柱销的半径也通过设计变量参数化, 在轴孔和柱销之间

施加 CAD 接触力以模拟实际机构中轴孔与柱销的碰撞作用,同时施加平面副进行约束以保证不偏离回转平面^[11]。通过仿真计算,当曲柄长度为 200mm,连杆长度为 400mm,曲柄和连杆间的运

副间隙以及连杆和滑块间的运动副间隙均为 1mm 时,曲柄角度 $\alpha = 90^\circ$ 时滑块位移为 170.835mm, $\alpha = 135^\circ$ 时滑块位移为 283.056mm。

表 1 曲柄滑块机构的尺寸误差和运动副间隙误差分布类型及参数(单位:mm)

Table 1 The parameters and distribution types of the geometry errors and joint clearance errors of the crank-slider mechanism

变量	含义	分布	均值	方差	左截尾	右截尾
r_1	曲柄长度	正态	200	1	—	—
r_2	连杆长度	正态	400	1	—	—
Δ_1	曲柄和连杆间的运动副间隙	截尾正态	1	0.5	0	2
Δ_2	连杆和滑块间的运动副间隙	截尾正态	1	0.5	0	2

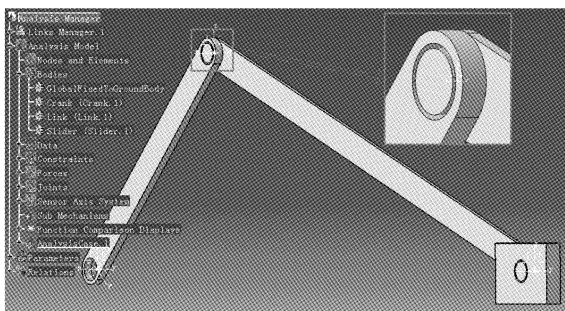


图 3 曲柄滑块机构的确定性模型及间隙放大图
Fig. 3 The determinate model of the crank-slider mechanism and the zoom of joint clearance

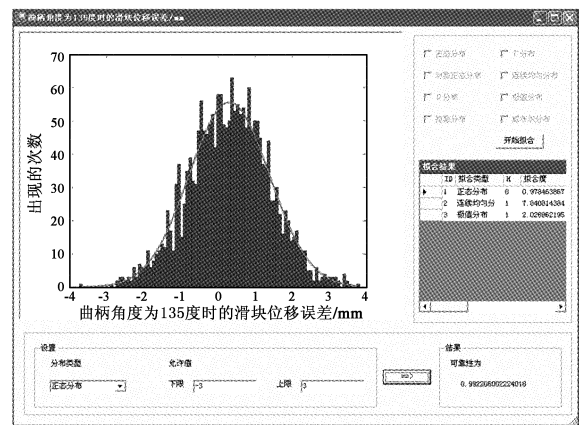


图 5 曲柄角度 $\alpha = 135^\circ$ 时滑块位移误差的正态分布拟合图

Fig. 5 The fitted normal PDF of the displacement errors of the slider when the crank angle $\alpha = 135^\circ$

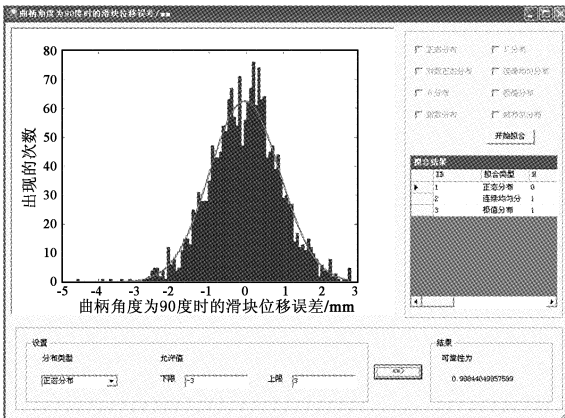


图 4 曲柄角度 $\alpha = 90^\circ$ 时滑块位移误差的正态分布拟合图

Fig. 4 The fitted normal PDF of the displacement errors of the slider when the crank angle $\alpha = 90^\circ$

(2) 可靠性仿真与分析。在运动机构可靠性仿真试验系统中导入确定性模型文件,依据问题描述选取基本随机变量并根据其分布参数进行随机抽样,调用多体仿真软件 LMS Virtual. Lab 进行可靠性仿真试验,仿真次数为 2000 次。仿真试验结束后,

得到 2000 次仿真的曲柄角度 $\alpha = 90^\circ$ 以及 $\alpha = 135^\circ$ 时的滑块位移,通过计算位移误差并对其进行分布拟合和参数估计,采用 Kolmogorov 假设检验,发现结果能更好地服从正态分布,如图 4 和图 5 所示。采用求解累积分布函数值来求解可靠度,其结果见表 2。

表 2 滑块位移误差的分布参数估计、假设检验结果及可靠度(单位:mm)

Table 2 The estimated distribution parameters, hypothesis test results and reliability of the displacement errors of the slider

曲柄角度 α	分布	均值	方差	拟合度	可靠度
90°	正态	-0.0456	0.9473	0.6084 (H = 0)	0.9984
135°	正态	0.3047	1.0877	0.9785 (H = 0)	0.9922

3.2 算例 2:某舱门锁机构

某舱门锁机构包含了 6 个构件(作动筒,活塞,锁钩以及三个连杆),机构中铰均为旋转副(共 6 个),连杆 2 与锁钩之间通过弹簧连接。考虑锁机构的打开过程,该过程的求解实际上是正逆运动学混合问题:当锁处于锁紧状态时,锁钩受到来自弹簧的拉力,锁钩同时与舱门发生接触,受到垂直方向上的法向力和水平方向上的摩擦力,活塞与作动筒的左壁发生接触,受到水平方向上的阻力和垂直方向的摩擦力;在锁打开过程中以活塞上的外力做为驱动力,该力随时间线性变化,当力达到一定大小时将推动连杆 1,并通过机构的运动连接关系使得锁钩绕铰 H1 旋转,锁钩旋转到一定角度后锁钩与舱门脱离,不再受到舱门的接触力,之后锁钩将在活塞力和弹簧力的联合作用下打开到最大位置,使得活塞与作动筒的右壁发生接触。

假定锁机构的随机变量以及分布参数如表 3 所示。设此机构的活塞力 F 不能要求过大,许用活塞力大小为 $[F] = 200\text{N}$;同时要求锁打开时间 t 不能超过 $[t] = 0.3\text{s}$ 。

表 3 锁机构的随机变量分布类型及参数

Table 3 The distribution types and parameters of the random variable of the lock mechanism

变量/单位	含义	分布	均值	方差
$X_1 / (^\circ)$	锁钩与舱门脱离的角度	正态	45.5	0.15
X_2 / N	舱门与锁钩之间的最大接触力	正态	500.0	10.00
X_3	活塞力的变化斜率	正态	9.5	0.05
$X_4 / (\text{N/m})$	弹簧的弹性系数	正态	7400.0	50.00

(1) 确定性模型的建立。依据问题描述,在 LMS Virtual Lab 中进行锁机构的参数化建模和仿真分析。参数化建模过程中,将锁钩与舱门脱离的角度 X_1 命名为 TouchAngle,舱门与锁钩之间的最大接触力 X_2 命名为 TouchForceMax,活塞力的变化斜率 X_3 命名为 OpenSlope,弹簧的弹性系数 X_4 命名为 Spring Constant。确定性模型如图 6 所示。

(2) 可靠性仿真与分析。同样,在运动机构可靠性仿真试验系统中导入确定性模型文件,依据问题描述选取基本随机变量并根据其分布参数进行随机抽样,调用 LMS Virtual Lab 进行可靠性仿真计算,仿真次数为 3000 次,每次的计算时间为 6s,总时间约为 5 个小时。仿真结束后,进行可靠性分析和

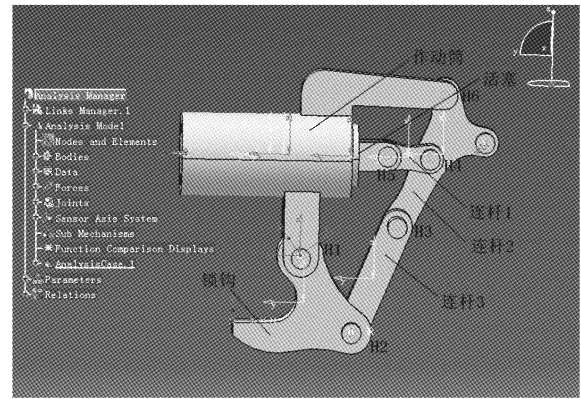


图 6 锁机构的确定性模型(锁紧状态)

Fig. 6 The determinate model of the lock mechanism (locked state)

灵敏度分析。在锁机构打开过程中需要同时考虑活塞驱动力和打开时间两种失效模式,则系统失效域为串联。通过蒙特卡罗可靠性计算方法得到其可靠性为 0.9887。对四个随机变量的分布参数进行灵敏性分析,并归一化处理,见图 7,界面中表中的各数据是没有经过归一化处理时的各随机变量分布参数的灵敏度,界面中的图显示的是经过归一化处理后的各随机变量分布参数的灵敏度之间的比较,其中 $X_{i,j}$ 指示第 i 个随机变量的第 j 个分布参数对失效概率的进行归一化后的灵敏度,当第 i 个随机变量服从正态分布时, $X_{i,1}$ 表示为该随机变量的均值对失效概率的进行归一化后的灵敏度, $X_{i,2}$ 表示该随机变量的方差对失效概率的进行归一化后的灵敏度,从图中可以发现锁钩与舱门脱离的角度以及活塞力随时间的变化斜率对失效概率的影响很大,失效概率随着活塞力变化斜率均值和方差的增大而增大,随着锁钩与舱门脱离的角度均值和方差的增大而减小。

4 结论

(1) 以解决机构可靠性工程实际问题为目标,借助机构可靠性分析的数字仿真技术和相应的软件工具,建立了一种能够进行工程实际运动机构可靠性联合仿真分析的可靠性仿真试验系统。

(2) 通过考虑几何尺寸误差和运动副间隙误差的曲柄滑块机构运动精度可靠性仿真分析以及考虑多失效模式下力学变化特性对锁机构打开过程的可靠性及灵敏性分析,验证了使用该可靠性仿真试验

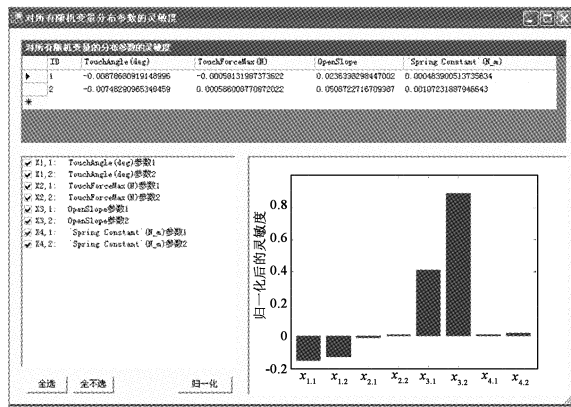


图 7 锁机构各随机变量分布参数对失效概率的灵敏度
Fig.7 The sensitivities of the failure probability with respect to the distribution parameters of the random variable of the lock mechanism

系统进行机构可靠性仿真和分析的可行性和有效性,从而为复杂运动机构可靠性分析提供一套完整的分析流程,利用该仿真试验系统对复杂运动机构进行可靠性分析将是本文的一个后续研究。

(3) 如何融合更高效的抽样方法从而提高可靠性仿真计算速度是有待解决的问题,这将对后续采用该可靠性仿真试验系统进行复杂工程运动机构的可靠性及灵敏性分析提供更方便的技术手段,同时也能节省大量的计算时间。

参 考 文 献

[1] 张建国,刘英卫,苏多.飞行器机构可靠性分析技术及应用[J].航空学报,2006,27(5):827-829. [Zhang Jian-guo, Liu Ying-wei, Su Duo. Analysis techniques for aircraft mechanism reliability and application[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(5): 827-829.]

[2] 拓耀飞,陈建军,张驰江,等.弹性曲柄滑块机构的运动精度可靠性分析[J].机械设计与研究,2006,22(1):26-28. [Tuo Yao-fei, Chen Jian-jun, Zhang Chi-jiang, et al. Reliability analysis of kinematic accuracy for elastic slider crank mechanism [J]. Machine Design and Research, 2006, 22(1): 26-28.]

[3] Rao S S, Bhatti P K. Probabilistic approach to manipulator kinematics and dynamics [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 72 (8) : 47 - 58.

[4] 于霖冲,白广忱,焦俊婷,等.柔性机构变形动态响应可靠性分析方法[J].宇航学报,2006,27(5):1039-1043. [Yu Lin-chong, Bai Guang-chen, Jiao Jun-ting, et al. Research on deformation dynamic response reliability analysis of flexible mechanism[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(5): 1039-1043.]

[5] Pfeiffer F, Glocker Ch. Contacts in multibody systems[J]. Journal

of Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 64(5) : 773 - 782.

[6] Flores P, Ambrosio J, Claro J C P, et al. A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41 (3) : 247 - 261.

[7] 阎绍泽.航天器中含间隙机构非线性动力学问题及其研究进展[J].动力学与控制学报,2004,2(2):48-52. [Yan Shao-ze. Development and problems of nonlinear dynamics of the mechanisms with clearances for spacecrafts [J]. Journal of dynamics and Control, 2004, 2(2) : 48 - 52.]

[8] Schiehlen W. Computational dynamics: theory and applications of multibody systems[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2006, 25 (4) : 566 - 594.

[9] Wang S X, Wang Y H, He B Y. Dynamic modeling of flexible multibody systems with parameter uncertainty [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 36(3) : 605 - 611.

[10] Maymon G. Reliability demonstration of aerospace structures-a different approach [C]. 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg, USA, April 7 - 10, 2008.

[11] 纪玉杰,孙志礼,李良巧.曲柄滑块机构运动可靠性仿真[J].兵工学报,2006,27(1):16-20. [Ji Yu-jie, Sun Zhi-li, Li Liang-qiao. Simulation on motion reliability of crank-slider mechanism [J]. Acta Armamentari, 2006, 27(1) : 16 - 120.]

[12] 张建国,苏多.空间柔性机构运动可靠性分析[J].北京航空航天大学学报,2006,32(1):121-124. [Zhang Jian-guo, Su Duo. Reliability of space flexible mechanisms [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32 (1) : 121 - 124.]

[13] D'Ippolito R, Donders S, Hermans L, et al. A fatigue life reliability-based design optimization of a slat track using mesh morphing [C]. III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, June 5 - 8, 2006.

[14] 许淑艳.蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M].北京:原子能出版社,2006:1-4.

[15] Wu Y T. Computational methods for efficient structural reliability and reliability sensitivity analysis [J]. AIAA Journal, 1994, 32 (8) : 1717 - 1723.

作者简介:王慧(1983-),女,博士研究生,主要从事飞行器结构/机构可靠性分析与可靠性优化设计。
通信地址:西北工业大学航空学院(710072)
电话:13772127636
E-mail:wanghnpu@126.com

(编辑:沃云峰)