

文章编号: 1674-8190(2023)06-014-15

飞机锁类机构性能退化可靠性分析方法综述

江德印, 韩雅洁, 陈天昱, 江书海, 崔卫民
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 随着航空航天装备的快速发展,对飞行器装备的可靠性要求逐渐提高,飞机锁类机构的可靠性对飞机起降的安全至关重要。以飞机舱门锁机构为研究对象,首先通过文献调研了大量舱门锁机构并分析了锁机构的特点和失效模式,阐述了锁机构的工作原理。其次综述了锁机构失效机理建模、机构渐变损伤的研究现状以及目前存在的问题,分析了国内外有关锁机构可靠性的研究现状;并针对多连杆机构可靠性分析和锁机构可靠性分析进行了分类梳理。最后对锁机构的可靠性分析研究思路进行总结,并对目前复杂锁机构的可靠性分析存在的问题及其研究趋势进行了展望。

关键词: 飞机起落架;飞机锁机构;渐变损伤;可靠性分析;机构退化

中图分类号: V215.7; V226

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.02

Review of reliability analysis methods for performance degradation of aircraft lock mechanism

JIANG Deyin, HAN Yajie, CHEN Tianyu, JIANG Shuhai, CUI Weimin
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the rapid development of aerospace equipment, the reliability requirements of military equipment are gradually increasing, and the reliability of the aircraft lock mechanism is crucial to the safety of aircraft take-off and landing. In this paper, the aircraft cabin door lock mechanism is taken as the research object. Firstly, a large number of cabin door lock mechanisms are investigated through literature and the characteristics and failure modes of the lock mechanism are analyzed, and the working principle of the lock mechanism is described. Secondly, the failure mechanism modeling of lock mechanism and the status quo of gradual damage of lock mechanism and the existing problems are described. The reliability research status of locking mechanism at home and abroad is analyzed. The reliability analysis of multi-link mechanism and lock mechanism are classified and combed. Finally, the research ideas of reliability analysis of locking mechanism are summarized, the existing problems and research trends of reliability analysis of complex mechanisms are also prospected.

Key words: aircraft landing gear; aircraft lock mechanism; gradual damage; reliability analysis; institutions degradation

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 国家973项目子课题(2015MC010023)

通信作者: 崔卫民, cuiwm@nwpu.edu.cn

引用格式: 江德印, 韩雅洁, 陈天昱, 等. 飞机锁类机构性能退化可靠性分析方法综述[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 14-28.

JIANG Deyin, HAN Yajie, CHEN Tianyu, et al. Review of reliability analysis methods for performance degradation of aircraft lock mechanism[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 14-28. (in Chinese)

0 引言

随着对飞机性能的要求越来越高,新型飞机逐渐使用更复杂的机构,例如导弹武器舱、起落架舱门以及运输机中多个舱门和多把锁的复杂运动机构。这些机构的性能对飞机安全非常重要^[1-2]。根据美国航空安全报告系统1993—2008年的统计数据,起落架舱门失效案例达到91起,占起落架系统失效案例总数的近10%^[3-4]。而起落架舱门系统的锁机构就是新型复杂机构之一。锁类机构作为一种常用机构在飞机上应用十分广泛,如各型飞机起落架上位锁、下位锁,起落架舱门锁,各种舱门的开闭锁,战斗机内埋式弹舱舱门的开闭锁等。

锁类机构广泛应用于各种飞机中,据统计,某先进战机中有110余处锁机构;大型运输机中有240余处锁机构。例如,为增强隐身性,某飞机起落架舱门锁从传统的3把增加到8把;为适应大尺寸/大变形需求,某大型运输机一个后货舱中间舱门就有14把锁机构。据以往的失效数据表明,军用飞机中锁类机构失效占机械类失效的约25%。另外我国战斗机的寿命从2 000飞行小时增加到8 000飞行小时,运输机的寿命从6 000飞行小时增加到20 000飞行小时。随着服役时间的增加,锁类机构发生故障的概率也大幅增加,多次发生卡滞和运动精度不足的功能失效,暴露出可靠性仍不能满足飞机日益提高的高可靠长寿命指标要求,严重影响了飞机的任务可靠性和安全性。例如某国产主力战机阻力伞锁系统2004年至今已发生了363起故障,其中发生锁机构功能失效124起,占比34.2%。锁机构一旦发生故障,就有可能对飞机的飞行任务和飞行安全造成重大影响,有些故障甚至是致命的,事实上很多飞行事故就是由于锁机构的故障引起的。

本文对航空舱门锁机构类型和失效模式进行分类总结,分析锁类机构的功能原理,综述国内外对锁类机构的建模方法和功能退化问题的研究思路,阐述关于锁类机构的误差传播和可靠性分析问题的研究现状,总结已有成果并展望未来发展趋势。

1 锁机构简介

1.1 航空舱门锁机构分类

航空锁类的种类繁多,根据实际使用情况的不同,锁的机构外形和运动机理也不尽相同,如图1所示。按照有无直接动力可分为:主动式锁和被动式锁;按照用途可分为:起落架的锁^[5-6]、客货舱舱门锁^[7]、弹仓舱门锁^[8]等;按照机构原理可分为:多连杆机构锁^[9-11]、曲柄摇臂机构锁^[12-13]、曲柄滑块机构锁^[14-16]和组合机构锁^[17]等。

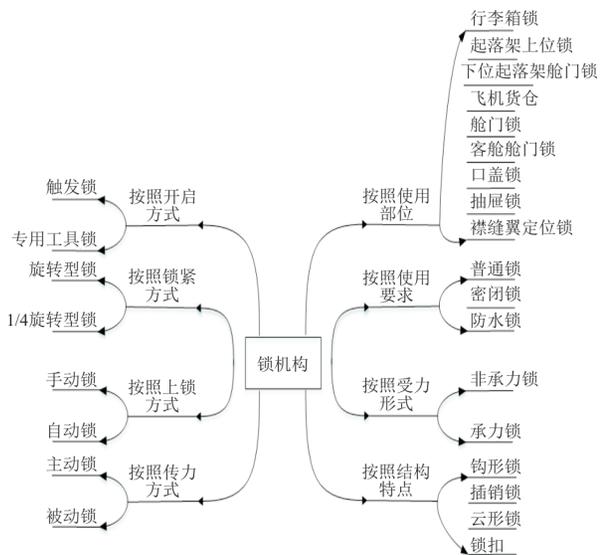


图1 锁机构分类图

Fig. 1 Classification diagram of locking mechanism

1.2 锁机构失效模式

随着可靠性研究的不断深入,机械的强度可靠性和结构可靠性已经取得很大成就。而机构可靠性问题逐渐凸显出来,尤其是现代机械,正朝着高度自动化、高度精密化等方向发展,以机构运动的准确可靠为主要指标的可靠性问题日益成为关注的焦点^[18-20]。调查表明,现代机械设计的强度余度远超过其工作载荷,一般故障的表现形式主要是机构故障。

机械产品在工作过程中的主要失效模式可以分为零部件级的失效和系统级失效两个层次,根据美国《NSWC(海军水面作战中心)机械设备可靠性预计程序手册》^[21],摘取典型机械产品零部件级失效和系统级失效模式,如表1所示。

表 1 典型机械产品失效模式表
Table 1 Table of failure modes of typical mechanical products

级别	对象	主要失效模式
零件级	齿轮	表面接触疲劳损伤、齿轮断裂、磨损等
	紧固件	断裂、变形、滑扣
	弹簧	断裂、变形、松弛、磨损等
	作动器	卡滞、行程减少
	轴承	疲劳损伤、噪声、异常变形等
系统级	锁机构	开锁失效、锁定位置精度失效、误开锁、误上锁
	液压泵	输出压力不足、压力脉动过大
	减压阀门	输出压力不足、稳定时间过长、阀门异响
	减速器	输出异常、输出精度不足
轴航向载荷机构	载荷位移性能失效、空行程过大	

复杂机构的失效模式分为三类^[22]。I类失效模式:是指构件在工作过程中的静强度破坏、动强度破坏和疲劳强度破坏等强度破坏失效模式,如图2所示。此类失效模式的机理分析结合经典强度破坏理论即可,计算较为规范,并且已经被整理成册,有各种不同的军用标准、机械设计手册、型号可靠性设计手册和行业手册作为参考,因此这类问题大部分可以直接借鉴现有的结构构件可靠性理论解决。II类失效模式:是指单个运动副的破坏。运动副在机构的工作过程中随着长时间载荷的积累和磨损疲劳的积累,会发生老化、磨损、疲劳和腐蚀等失效模式,如图3所示。这些不同的失效模式对应的失效机理现有研究已经硕果累累,腐蚀、疲劳、磨损等理论已经发展得较为完善,因此该类可靠性问题也可以相当程度上借鉴已有理论解决^[23-29]。III类失效模式:是指未发生I、II类失效时机构系统的功能失效。由于机构发生前两类失效的条件较为苛刻,在发生构件或运动副单个失效之前往往会因为一些误差、疲劳或能量积累的原因,使系统功能发生失效,如飞机襟翼卡滞^[30]、锁机构发生误上锁等现象^[31]。



(a) 静强度破坏



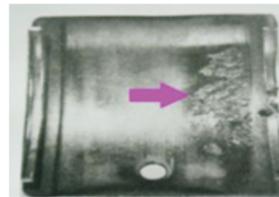
(b) 动强度破坏



(c) 疲劳断裂

图 2 I类失效

Fig. 2 I kind of failure



(a) 接触疲劳



(b) 磨损



(c) 老化



(b) 腐蚀

图 3 II类失效

Fig. 3 II kind of failure

综上所述,I类、II类失效主要关注的是各个零部件的损耗破坏的结果,其分析层次属于零件级失效。III类失效模式是以系统的层面来分析,综合考量各个零件在工作过程中失效程度的积累对整个系统可靠性的影响。目前,III类失效情况在工程中日益突出,尤其是对于高可靠性要求的机构。III类失效的机理比较复杂,影响因素较多,目前在此方面的研究也不够完善,因此对于III类失效的失效机理研究还需要做更多的工作。

2 锁机构功能原理

西北工业大学宋笔锋教授团队^[32]所研究的航

空锁类机构是由机—电—液构成的组合机构,是一类典型的多失效模式复杂机构,为机械锁。大多数情况下,机械锁机构的主要零部件有锁钩、锁环、锁键、作动筒、运动的多连杆机构和弹簧^[1, 32],如图 4 所示。其工作流程为:机构处于相对平衡状态—作动筒提供驱动力—驱动力经连杆机构传递给锁钩—锁钩在驱动力作用下进行平面运动,接触或释放锁环完成上锁/开锁任务—作动筒撤力后机构在弹簧弹力作用下维持新的平衡状态。

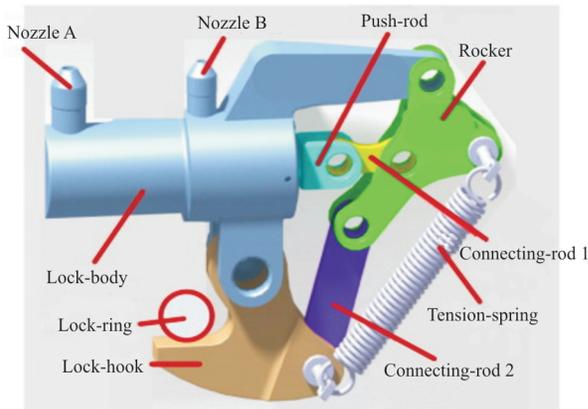


图 4 航空舱门锁机构模型^[1]

Fig. 4 Door lock mechanism model of cabin^[1]

南京航空航天大学 Zhang J 等^[33]研究某型飞机起落架的上锁机构,该机构主要由主支柱、侧柱、液压执行机构、电驱动执行机构、锁钩、锁摇臂和上锁弹簧组成,其机理图如图 5 所示。主撑杆和侧撑杆是主要的固定支撑件,液压执行器是正常释放解锁驱动件。当电驱动在紧急情况下开锁时,电驱动执行器推动锁臂带动锁钩完成上锁/开锁动作。

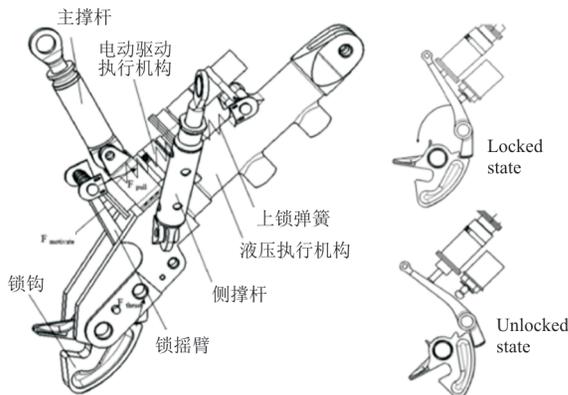
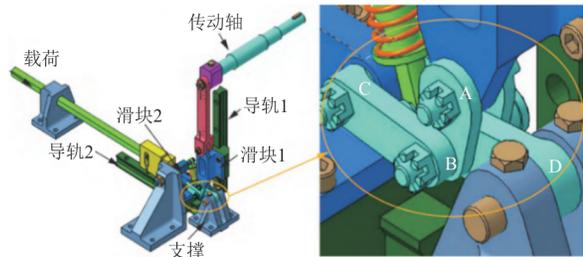


图 5 飞机起落架上起落架锁定机构及其加载示意图^[33]

Fig. 5 Landing gear locking mechanism and loading diagram of aircraft landing gear^[33]

Zhuang X C 等^[23-24]和 Shen L J 等^[34]研究的舱门锁机构如图 6 所示,该锁机构可实现舱门的开闭动作。开启过程:系统发出解锁信号,传动轴由电机驱动逆时针旋转,联动装置沿导轨 1 向下推动滑块 1,使联动装置 AB 向下移动,然后连杆机构 BC 逆时针旋转并驱动滑块 2 沿导轨 2 向前移动,当导杆向左移动到最大位置处时,舱门处于完全打开状态,电机停止工作,舱门保持打开状态。关闭过程:系统发出关锁信号,电机驱动传动轴逆时针旋转,联动装置沿导轨 1 向上推动滑块 1,带动 AB 机构向上移动,然后连杆机构 BC 顺时针旋转,同时带动滑块 2 沿导轨 2 向后移动,当导杆向右移动到最大位置处时,舱门关闭,电机停止工作,舱门保持关闭状态。



(a) 整体图

(b) 局部放大图

图 6 航空舱门锁机构模型^[23]

Fig. 6 Mechanism model of cabin door lock^[23]

通过分析多种航空舱门锁机构的工作原理(如图 7 所示)可知,航空舱门锁机构主要有以下特点:1) 锁机构的基本原理是多连杆机构。航空锁类机构大部分采用机械连杆机构将作动筒的驱动力传递给锁钩来完成上锁或开锁任务。多连杆机构主要由若干个构件用低副(转动副或移动副)相连接构成,低副的接触面积大,能传递较大的载荷并且抗磨损能力出众,而且其接触面一般为圆柱表面或者平面,易于制造,容易获得较高的加工精度。2) 弹簧在锁机构中主要起复位和给机构提供固紧力以保持平衡的作用。选用弹簧的主要原因是,在锁机构的设计过程中,为了使机械锁在打开或者关闭后满足不需要作动筒外力、靠自身的几何结构特点就能实现平衡并保持在对应位置,多采用过“死点”的设计^[31]。3) 驱动方式均采用作动筒,液压作动筒的优势是原理简单、配置灵活,其设计和制造都比较简单,应用广泛。在航空产业中选取液压筒作为动力提供方式主要是因为其在飞

机飞行过程中,锁机构驱动状态下需要的驱动力较大,并且需要较快的响应时间,这一点液压作动筒可以比较好地完成,但是由于锁机构作动时间

快,行程短,液压筒也很容易由于交变载荷引起疲劳渐变损伤的累积而导致失效,这也是工程上值得关注的问题。

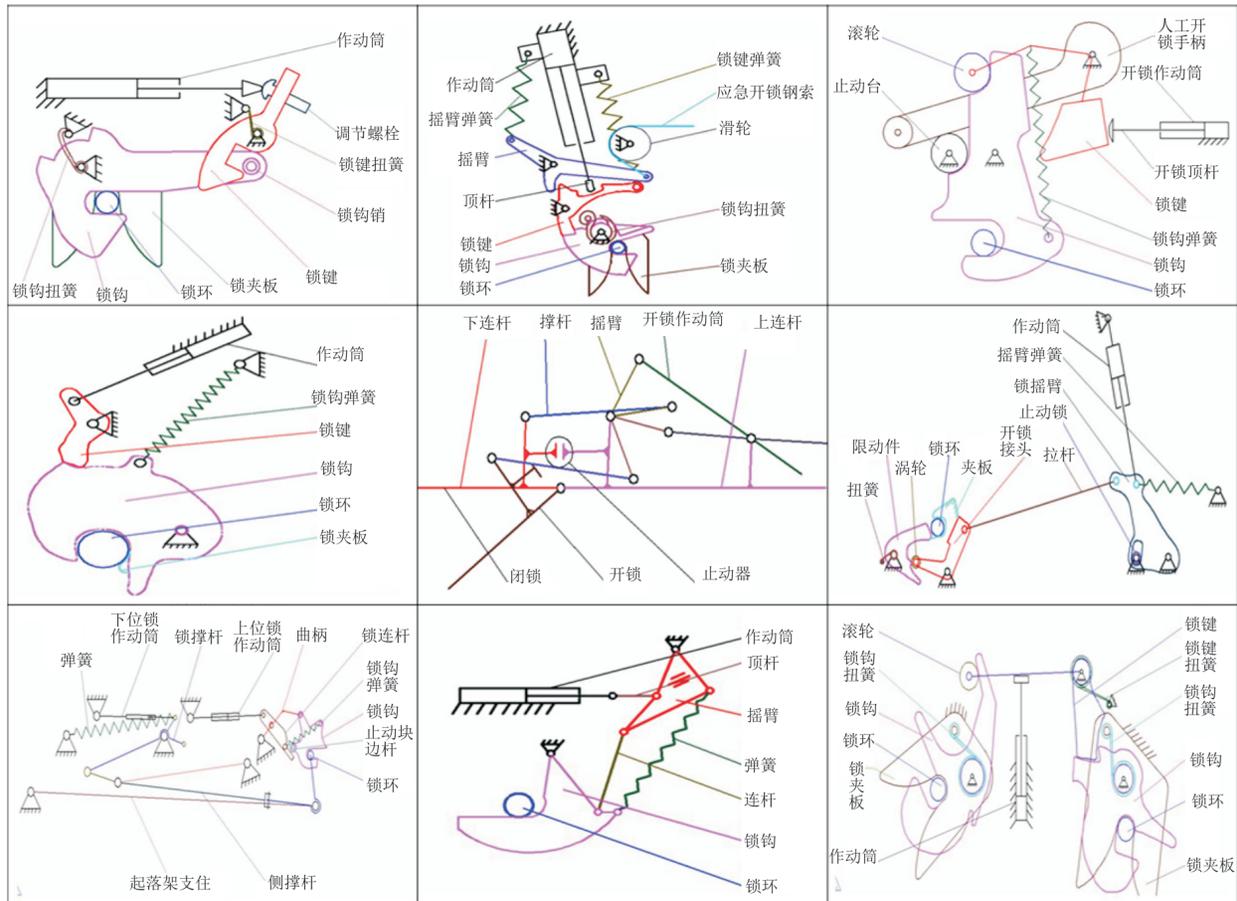


图7 多种飞机舱门锁机构原理图

Fig. 7 A variety of aircraft cabin door lock mechanism schematic

3 锁机构建模问题

飞机锁类机构功能故障频发但难以从设计上彻底解决此问题,其根本原因有以下2个方面:1)实际工程中广泛存在的随机振动/温湿变化/冲击载荷等复杂环境因素组合作用下,锁类机构的失效机理模型精细化建模不准确;2)锁类机构多渐变损伤耦合的功能退化机制不清及退化模型描述不准确。

3.1 机构运动精度失效和复杂环境因素影响的建模

针对机构失效机理与相关影响因素等问题,国内外开展了一些行之有效的研究。关于机构运动精度问题,国外开展研究较早,对机构功能失效

的研究最早能看到的文献在20世纪60年代,J. J. Uicker等^[35]于1964年首次引入概率分析方法,基于杆件长度的最大允许公差,研究了四连杆机构的输出运动误差;S. Erkaya等^[36]提出的虚杆原理假设,将运动副间隙视为一根长度为间隙尺寸的无质量刚性连杆,研究其对平面四连杆机构动力学行为的影响;M. Machado等^[37]基于接触—碰撞模型,分析了间隙运动副个数和间隙大小对机构动力学行为的影响。国内在考虑初始状态随机性,如加工误差、装配间隙等的机构功能可靠性问题上研究较为深入。拓耀飞等^[38]基于有限单元法分析弹性曲柄滑块机构的运动精度可靠性;易敏^[39]以曲柄滑块机构为例,探讨了转动副间隙对机构动态特性的影响;赖雄鸣等^[40]分析了尺寸误差、装配误差、间隙、摩擦系数、载荷、速度等多种

因素对机构运动精度的影响,获得了运动周期内机构输出位移的可靠性精度曲线。相比于机构运动精度失效分析,国内有关机构卡滞失效的研究相对较少。冯蕴雯等^[41]通过分析卡滞失效出现的原因,详细给出了不同卡滞问题的失效判据;陶周亮等^[42]就飞机舱门机构卡滞问题展开了研究。由于引起卡滞失效的原因很多且没有建立较完善的理论,在计算过程中卡滞失效判据定量描述稍显困难,大部分相关研究局限于简单模型,发展较为缓慢。

在复杂环境因素下,影响机构功能失效的环境因素主要有载荷、温度、振动、腐蚀和沙尘等。通常研究材料在复杂环境中的力学性能和材料属性变化。关于振动和变载荷下材料的失效问题,U. Wagner等^[43]研究冲击载荷对机械产品的可靠性影响;Li W等^[44]针对恒定和可变载荷下表面强化钢的内部诱发疲劳,对失效机理进行损伤建模;Hu X等^[45]提出一种新的高温变载荷条件下金属材料蠕变损伤评估方法;Qian G等^[46]建立了载荷幅值对疲劳寿命影响的疲劳失效统计模型。关于变温和腐蚀环境导致材料加速失效问题,Liu J Y等^[47]研究温度对复合材料桁架芯夹层结构弯曲性能及破坏机理的影响;Zhao X等^[48]研究航空发动机热部件的失效模式,为了准确预测热部件的蠕变损伤和剩余寿命,提出了一种新的非线性蠕变损伤累积模型。

尽管研究人员在机构的运动精度和机构卡滞失效方面取得了丰富的研究成果,但其中大部分是对间隙和误差对机构运动精度展开分析。相关技术包括利用有限元模型、多体动力学分析等。然而,对于机构来说,多工况和多失效模式及其之间的相关性方面的研究较少。实际情况下,绝大多数分布锁类机构都在复杂环境(包括温度、振动和载荷等)中工作,严酷的外部环境因素严重影响锁机构的可靠性,精确考虑多环境因素影响的机构失效机理模型较为少见。

3.2 机构中的渐变损伤演化规律

机构中渐变损伤主要包含磨损、变形、腐蚀和老化等,在锁类机构中主要的渐变损伤是前三种。在机构的磨损、腐蚀和变形等失效方面,已有较多

研究成果。基于相关的磨损理论,众多研究者纷纷研究相应的磨损量化公式,陆续提出了大量的磨损计算模型。根据Meng H C等^[49]的研究,共有300多项关于摩擦和磨损的模型,在这些方法中,最常用的模型有两个,即Reye模型和Archard模型。这两个模型关联了磨损体积和接触体的物理、几何参数,如材料的硬度、载荷和滑移距离等。P. Flores等^[50]详细阐述了机构中运动副间隙的建模方法,以及在考虑加工误差、润滑条件和磨损损伤下的机构动力学行为分析方法,并列举了相应的分析案例;S. Mukras^[51]提出了旋转副的磨损模型,将磨损量看作时间的函数,通过迭代计算获得曲柄滑块机构多个运行周期下的运动副磨损程度。考虑多连杆机构中铰链磨损问题,Chen X L等^[52-55]对润滑间隙接头和磨损的平面多体系统动力学行为展开研究;Li B等^[56]开发一种综合方法,用于预测具有多个间隙接头的平面机械系统中9种磨损并研究其相互作用;Liu H J等^[57-58]研究航空齿轮的接触疲劳问题发现,齿形接触疲劳损伤和齿廓磨损并存,导致表面引发失效和亚表面引发接触疲劳失效之间存在复杂的竞争机制,基于弹塑性有限元法建立了航空齿轮副的疲劳磨损耦合模型。

锁类机构在沿海地区的工作环境下,腐蚀失效较为明显,腐蚀失效主要是电化学腐蚀,机构旋转接头在腐蚀性环境条件下的耐用性会大幅降低^[59],并且不同材料的钢和铝结构的机械耦合增加了电偶腐蚀的风险,因为这两种合金的电化学行为不同^[59-60]。N. Lebozec等^[61]证明了在加速腐蚀试验中暴露的焊接接头的机械性能损失是由于重叠区域的腐蚀退化导致了失效模式的改变;L. Calabrese等^[62]在临界环境条件下进行了长期老化测试,实验结果表明,腐蚀现象是接头性能下降和机构失效的主要原因。然而,即使旋转接头在腐蚀性环境中的耐久性问题在工业上的影响众所周知^[61],在文献中也很少有研究人员能将腐蚀退化方面与接头的机械失效行为联系起来。机构零件变形失效在复杂机构中很常见。关于复杂机构中的杆件变形,材料力学已经形成一套完善的理论体系,国内外研究已经比较完善。

1) 引起锁类机构失效的三种主要原因是磨

损、变形和腐蚀等渐变损伤。对于各类渐变损伤国内外已经展开了充分的研究,各自形成一套研究体系;2) 针对锁类机构,引发失效的原因是多种渐变损伤耦合的影响,目前并没有方法可以解决多种渐变损伤耦合产生的失效,对机构失效的预测方法并不完善。

3.3 机构可靠性退化建模

对于机械机构,退化及其不确定性的研究是一个热门的研究问题。Sun Q Z 等^[63]、Ma Z H 等^[64]采用统计方法对机械系统的性能退化进行建模,发现机械系统性能衰退通常是由于磨损、疲劳等原因造成的。多数研究人员采用具有单调递增特征的随机过程对退化数据进行建模。Wang X 等^[65]首次将高斯过程作为一种灵活的模型来描述产品的退化过程。在此之后,Pan D H 等^[66]做出了大量的贡献;Liu B 等^[67]展开了具有退化组件的负载共享系统的可靠性建模和预防性维护研究。而对于机械产品,Pang H 等^[68]提出了一种基于失效物理的时变可靠性分析方法,在该方法中,考虑了时不变因素和时变因素,从实用性实验或损伤机理模型中可以得到构件的退化模型,使用响应面法获得设计变量与动态响应之间的关系。

在机构功能退化的可靠性建模中,大多数研究都是从失效数据出发,运用随机过程等数学工具对机构功能退化量进行预测分析。对于多渐变损伤耦合的机构退化机理,目前并没有针对性的随机性分析和可靠性退化建模方法,恰好飞机锁类机构具有多渐变损伤耦合失效和多失效模式的特点,需要进一步展开针对性的可靠性退化建模研究。

4 锁机构可靠性分析方法

随着可靠性研究的不断深入,机械强度可靠性^[69]和结构可靠性^[70]已经取得很大的成就,而机构可靠性问题逐渐凸显出来,尤其是现代机械,正朝着高度自动化、高度精密化方向发展,促使人们认识到,以机构动作的准确可靠为主要指标的可靠性问题日益成为关注的焦点。调查表明,现代机械设计的强度余度远超过其工作载荷,一般故障的表现形式主要是机构故障。锁机构设计过程

中存在的问题一般依赖试验和锁机构可靠性分析^[71-74]。在起落架锁机构可靠性分析中,起初依赖试验分析^[75-76],对于复杂机构的实验分析比较繁琐,并且很难找出核心问题。因此,仿真分析技术广泛应用到复杂机械结构的运动分析,并且很多研究者将电子可靠性的部分研究理论延伸到机械可靠性领域,将仿真分析和试验相结合,目的是提高复杂机构的运动精度和可靠性分析水平。

4.1 设计因素不确定性传播问题

机械产品由于尺寸误差、安装误差、材料特性、润滑性能、设计载荷和设计环境的随机性,对锁机构的运动精度影响也很重要,基于不确定性传播问题,国内外展开了丰富研究。不确定性传播分析即基于原始参数不确定性量化性能函数或响应函数的不确定性,通常对于结构的可靠性分析和设计具有重要意义。G. Stefanou^[77]在传统的基于概率的不确定性传播分析中,输入参数被视为随机变量,分析性能函数的概率分布特征;Jiang C 等^[78]认为在基于区间的不确定性传播分析中,输入参数被视为区间变量,需要计算性能函数的上下界;Dong X 等^[79]对多因素再热截止阀机构动力学进行不确定性分析;Zhang L 等^[80]基于模糊理论对工程实际问题中的机构设计变量的随机性进行建模;Zhang L 等^[81-82]基于概率不确定性混合模型对结构可靠性展开分析;K. Nirmala 等^[83]基于蒙特卡洛方法,考虑由于尺寸误差、安装误差等随机因素对机构几何模型的不确定性影响,最终对机构设计进行优化;Zhou S 等^[84]研究在随机和认知不确定性下,具有隐式极限状态函数的结构可靠性的不确定性传播问题,开展机构可靠性评估;Li X Y 等^[85]针对产品退化这一不确定过程,利用不确定性理论对加速退化试验(Accelerated Degradation Testing,简称 ADT)数据中的小样本问题引起的认知不确定性进行了量化,推导了产品的可靠性和寿命分布。考虑不确定性的传递进行可靠性分析是可靠性分析需要解决的基础问题。

4.2 多连杆机构可靠性分析

锁机构作为多连杆机构的一类应用,研究多连杆机构的工作原理对研究锁机构的重要程度不

言而喻。在多连杆机构中,运动精度的控制尤为重要。众多研究人员利用各类仿真软件对机械机构进行可靠性分析,有效地提高了机构的可靠性水平^[86-89]。多连杆机构在工业中运用广泛,有众多研究者对其运动学开展分析,研究了比较实用的仿真分析方法^[90-98]。提高多连杆机构的运动精度是研究目标,运动精度不足属于Ⅲ类失效。针对提高运动精度问题,Shi Y 等^[99]采用先进一阶二阶矩(Advanced First Order and Second Moment,简称 AFOSM)方法和蒙特卡洛仿真(Monte Carlo Simulation,简称 MCS)方法,分析了空间四连杆机构的运动可靠性特点,探讨了运动精度与关节磨损间隙的关系;Wang N F 等^[100]为了提高运动平稳性和运动精度可靠性,对机械手指四连杆机构的优化设计进行了研究;Li C 等^[101]建立了复杂机构系统的参数化虚拟试验模型,提出一种用于机构动可靠性分析的有效方法;Jing H L 等^[102]利用 MSC ADAMS 建立了飞机舱门的磨损模型,提出了一种基于运动精度的失效判据,为飞机舱门机构在磨损情况下提供了基本分析方法;Zhuang X C 等^[103]基于 Archard 磨损定律的三维有限元模型实现了齿轮门锁周期性载荷下典型旋转接头的磨损模拟;Wang X P 等^[104]利用数值模拟研究了间隙尺寸对连杆与滑块之间具有间隙接头的平面滑块曲柄机构的运动学和动力学特性的影响,数值结果表明,关节间隙的存在会导致运动学和动力学系统的特性出现高峰;Jiang S 等^[105]提出了一种适用于平面多连杆机构领域中多个旋转间隙副磨损建模和计算的数值方法,该研究为考虑多间隙磨损的平面多连杆机构动力学研究提供了理论依据;朱利媛等^[106]为了研究折叠弹翼锁紧机构展开到位瞬时的碰撞问题,基于刚柔耦合动力学理论,考虑了构件的弹性变形;Geng X Y 等^[107]通过结合多体动力学分析、磨损预测和运动学可靠性分析,对有关节非均匀磨损的精密机构进行了集成的非概率运动学分析;文献[108-115]分别对平面多连杆机构开展建模分析,为提高机构运动精度和可靠性做出重要贡献。

4.3 锁机构可靠性分析

机构可靠性分析方法以应力—强度干涉理论^[116]为基础,将机构各个影响因素看作基本随机

变量 x_i , 相应的联合密度函数为 $\Pi f(x_i, \theta_x)$, 利用自然规律建立机构的响应函数, 即得到基本随机变量与响应量之间的关系, 并根据基本随机变量的统计规律得到响应量的统计规律, 进而得到功能函数。但是对于复杂机构或系统, 一般难以得到显式的功能函数, 针对该问题, 发展了多种求解方法, 综合起来可分为近似解析法、数值模拟法和函数替代法(也称代理模型法)。西北工业大学的吕震宙教授团队^[117]对上述方法研究比较深入。机构可靠性分析方法如图 8 所示。

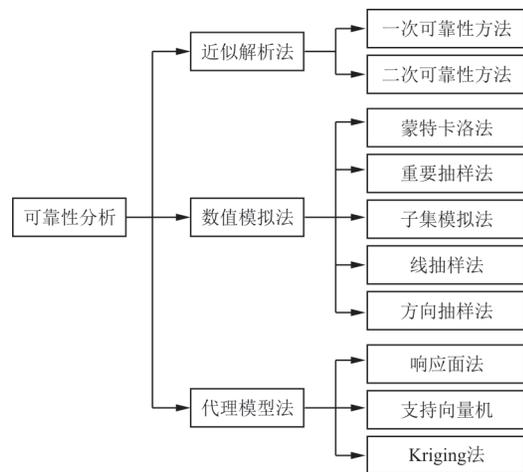


图 8 机构可靠性分析方法

Fig. 8 Mechanism reliability analysis method

针对锁机构的可靠性分析方法, Liu Z Q 等^[118]对锁机构性能进行了仿真, 考虑到锁钩与锁环间隙对锁机构的影响, 采用蒙特卡洛方法分析了飞机舱门锁机构的功能可靠性和灵敏度; Li X Y 等^[16]对飞机锁定机构开发了一种考虑磨损和多源不确定性引起的性能退化的基于性能裕度的可靠性分析, 分析每个不确定性来源的本质, 包括制造缺陷、材料特性、操作和环境压力以及性能阈值的不确定性, 并用概率分布量化每个不确定性, 建模流程如图 9 所示; Xu K 等^[119]基于奇异分岔理论研究双侧撑起落架的同步锁定性能, 从运动机构的角度解释了锁定过程中结构尺寸灵敏度高的原因, 并在单侧撑起落架的情况下采用数值延拓方法研究了锁定位置, 分析了双侧撑起落架锁定失败的原因, 并提出了一种同步锁定的运动学优化方法; J. A. Knowles 等^[120]对起落架锁机构的分岔设计展开研究, 利用一组耦合稳态方程形式的模

型来描述其运动机制。

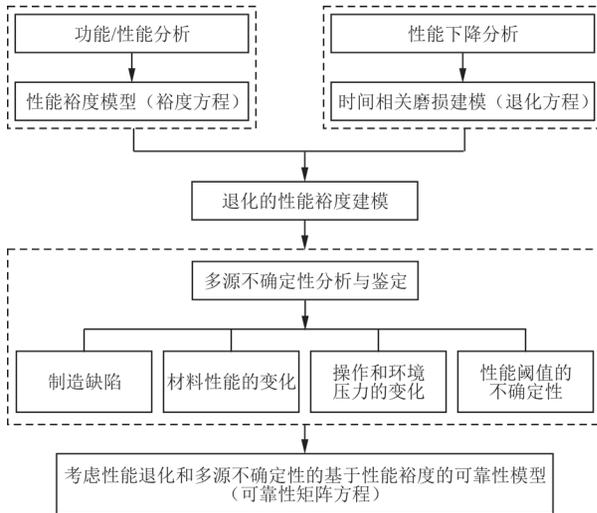


图9 性能退化和多源不确定性的飞机锁机构基于性能裕度的可靠性分析^[16]

Fig. 9 Reliability analysis of aircraft lock mechanism based on performance margin with performance degradation and multi-source uncertainty^[16]

建立影响机构失效的随机变量与响应值的函数关系,计算功能函数的失效边界。Guo W等^[1]提出了一种舱门锁机构失效边界分析方法:1) 基于仿真模型分别得到单参数和双参数的失效边界;2) 考虑锁定机构的装配误差,通过舱门锁系统试验验证锁环位置的失效边界。建模流程如图10所示。

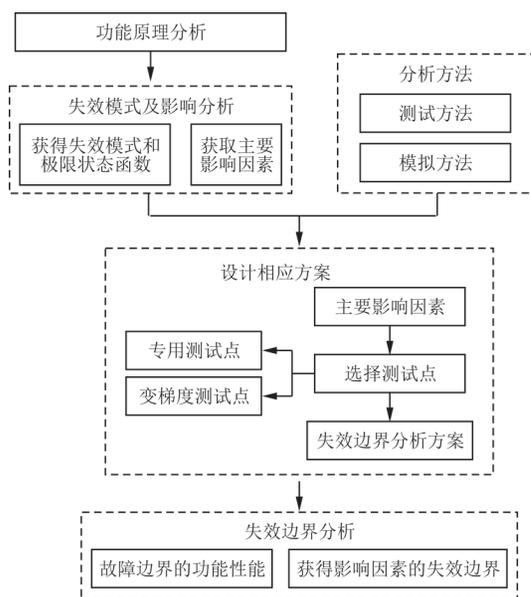


图10 锁机构失效边界分析方法^[1]

Fig. 10 Failure boundary analysis method of locking mechanism^[1]

关于寻找失效边界的研究,Song K L等^[121]开发了一种自适应失效边界逼近方法(Adaptive Failure Boundary Approximation Method,简称AFBM)。所提出的AFBM方法充分利用了可靠性分析的二元分类特征,可以有效地逼近原始模型的失效边界。对锁机构可靠性分析的非线性问题、小故障概率问题等进行了测试,效果较好。贾洁羽等^[122]提出了一种提高飞机舱门锁机构关闭系统的可靠性计算效率的方法,通过研究锁机构关闭过程中最大液压力失效和关锁时间失效模式这两种影响因素,依据许用应力建立失效判据,基于重要抽样法和BP神经网络方法,计算飞机舱门锁机构多失效模式下的可靠性。

Sun Z C等^[7]分析了运输机后货舱门锁失效机理并进行可靠性分析,找到故障机制以找出根本原因,并进行局部和全局可靠性灵敏度分析,得到对应随机变量的影响;Song K L等^[32]根据飞机锁定机构的运动原理,利用LMS Virtual Lab仿真平台建立了锁定过程的仿真模型,分别建立锁定过程的两种临界失效模式——关于最大锁定阻力和所需时间的两个性能函数,并结合克里金模型和重要性抽样方法来评估锁定过程的可靠性。“基于可靠性的设计优化(Reliability-based Design Optimization,简称RBDO)”已成为一个重要的研究领域。Shen L J等^[34]研究了具有多个相关组件的锁机构失效分析,由于退化机理的改变,对锁机构的退化现象利用维纳和高斯逆过程进行建模,并利用Vine Copula来描述这种相关性;Song K L等^[123]利用克里金法评估锁机构可靠性,结果表明Kriging法相较于仿真建模分析计算速度更快,效率更高,误差控制在5%以内。

对于机械机构,退化及其不确定性的研究是一个热门的研究问题,研究人员^[63-64,124-126]采用统计方法对机械系统的性能退化进行建模。Pang H等^[68]提出了一种基于失效物理的时变可靠性分析方法,在该方法中,考虑了时不变因素和时变因素,从实用性实验或损伤机理模型中可以得到构件的退化模型,使用响应面法(Response Surface Method,简称RSM)获得设计变量与动态响应之间的关系,将元件损坏视为一个随机过程,在得到损坏退化规律后,考虑所有参数的随机性,得到锁机构可靠性随工作时间的变化曲线,并预测其可靠寿命;Shen L J等^[127]以Vine Copula函数作为描

述多元相关性的灵活工具,对锁机构5种失效模式依赖性的结构系统展开可靠性评估与重要性分析,根据结果建议的重要性分析对多种失效模式进行排序,找出对系统影响较大的失效模式,从而简化系统分析;Zhuang X C等^[23]提出一种多关节磨损的锁机构寿命预测方法,研究磨损对锁机构运动精度的影响,结果表明该方法对锁机构的剩余寿命预测误差小于4%。上述研究提出的锁机构评估方法包含了解决锁机构运动副磨损的Ⅱ类失效,还有解决Ⅲ类失效的性能退化研究,对提高锁机构的运动精度和可靠性做出了较大贡献。

5 总结与展望

飞机起落架舱门的锁机构是飞机的关键部件之一,其故障会阻碍起落架的收放过程,锁机构的可靠性对于起落架是否正常收放至关重要。本文总结如下四点:

1) 锁机构是一种复杂的机械结构,从本质上讲,研究锁机构的可靠性其实也是研究复杂结构的可靠性。目前,复杂结构经过仿真建模分析后,对个别零部件做强化处理,机构的材料特性和力学性能已经可以满足机构的工作要求。

2) 锁机构作为平面多连杆机构,其可靠性的主要影响因素是杆件变形,其次是运动副的磨损。在锁机构的运动副旋转接头的磨损研究中,很多研究人员研究了磨损的计算方法,通过提高模型的计算准确性,从而提高平面多连杆的运动精度。

3) 通过计算机的仿真软件对锁机构进行多体动力学建模,缺点是计算量较大、计算时间长、计算成本高。因此,目前较多研究从统计学的角度进行分析,对机构进行确定性分析后,通过影响因素和响应量的函数关系,按一定的分布规律抽样进行计算。

4) 锁机构失效模式属于Ⅲ类失效模式,在前两种失效模式都不满足的情况下,需要探究锁机构的失效,大多数研究者进行多失效模式下的性能退化研究,探索多种失效模式的相关性,判断失效模式的严重程度,进而重点解决该问题。

目前,在众多研究者的共同努力下,复杂机构的可靠性分析方法逐步完善,但是目前也存在一些问题。

1) 在随机振动/温湿变化/冲击载荷等复杂环境因素下,建立机构的卡滞失效机理模型和运动精度不足失效机理模型,探索复杂环境因素与机构功能失效的关联关系,锁类机构失效机理模型精细化建模不准确是个难题。

2) 研究锁类机构的磨损/变形/腐蚀等单渐变损伤的演化规律,着重理清多部位/多类型渐变损伤耦合机制及其对机构功能失效的影响,建立考虑多渐变损伤耦合的机构功能退化模型,多渐变损伤的耦合关系及其对机构功能失效影响的关联模型描述不准确需要进一步研究。

3) 在仿真分析中,复杂机构失效模式和影响因素较多,提高复杂结构仿真建模的准确性,还没有成体系的解决方法。航空装备价格昂贵,无法进行大量试验,因此无法获得大量统计数据进行分析,也就是小样本甚至只有个位数的极小样本,如何扩充样本,如何进行小样本产品的可靠性分析和评估也是需要解决的问题。

锁机构存在的可靠性分析问题是解决复杂可靠性分析问题的一个缩影,研究方法也可以为研究其他机械机构提供思路。

参考文献

- [1] GUO W, CUI W M, SHI Y, et al. Function failure and failure boundary analysis for an aircraft lock mechanism[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 70: 428-442.
- [2] BONIOL F, WIELS V, AIT-AMEUR Y, et al. The landing gear case study: challenges and experiments[J]. *Int J Softw Tools Technol Transfer*, 2017, 19: 133-140.
- [3] REVELEY M S, BRIGGS J L, EVANS J K, et al. Causal factors and adverse events of aviation accidents and incidents related to integrated vehicle health management[J]. *Aviation Safety Reporting System*, 2011, 115: 19-23.
- [4] REVELEY M S, BRIGGS J L, EVANS J K, et al. Causal factors and adverse conditions of aviation accidents and incidents related to integrated resilient aircraft control[J]. *Air Transportation*, 2010, 117: 321-329.
- [5] YIN Y, NEILD S A, JIANG J Z, et al. Optimization of a main landing gear locking mechanism using bifurcation analysis[J]. *Journal of Aircraft*, 2017, 49(5): 1-14.
- [6] 杨易鑫, 印寅, 聂宏, 等. 基于分岔理论的起落架撑杆式锁机构设计[J]. *航空学报*, 2020, 41(11): 16-27.
YANG Yixin, YIN Yin, NIE Hong, et al. Strut locking mechanism design for landing gear based on bifurcation theory[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(11): 16-27. (in Chinese)
- [7] SUN Z C, YU T X, PANG H, et al. Failure mechanism and reliability analysis of the rear cargo door lock of transport aircraft[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 122(1):

- 4-15.
- [8] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册: 第2册——标准和标准件[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
Board Editors of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 2—standards and standard parts[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 商红军, 任守志, 闫泽红. 一种四连杆机构锁紧的铰链: 201310180826.6[P]. 2013-05-16.
SHANG Hongjun, REN Shouzhi, YAN Zehong. A four-bar locking hinge: 201310180826.6[P]. 2013-05-16. (in Chinese)
- [10] 安林超, 陈韵, 李一鸣, 等. 过轨桥式起重机的四连杆传动锁紧装置[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2): 17-21.
AN Linchao, CHEN Yun, LI Yiming, et al. Four-bar drive locking device of rail-crossing bridge crane [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(2): 17-21. (in Chinese)
- [11] 王鸿伟. 连杆机构门锁装置: 200820060023.1[P]. 2008-06-20.
WANG Hongwei. Door lock device of connecting rod mechanism: 200820060023.1[P]. 2008-06-20. (in Chinese)
- [12] 马光玉. 摇臂钻床摇臂锁紧装置: 200620084572.3[P]. 2006-05-19.
MA Guangyu. Rocker arm locking device of rocker arm drilling machine: 200620084572.3[P]. 2006-05-19. (in Chinese)
- [13] 蔡毅, 万里鹏, 吴兆洪, 等. 一种座舱盖锁机构: 201710-783816.X[P]. 2017-09-04.
CAI Yi, WAN Lipeng, WU Zhaohong, et al. A kind of hatch cover locking mechanism: 201710783816.X[P]. 2017-09-04. (in Chinese)
- [14] 李超, 赵书旺, 付涛, 等. 一种舱门锁: 201310373461.9[P]. 2013-08-23.
LI Chao, ZHAO Shuwang, FU Tao, et al. A kind of cabin door lock: 201310373461.9[P]. 2013-08-23. (in Chinese)
- [15] 杨磊, 房建党, 曹学军. 一种锁具测试装置及其测试方法: 201910871538.2[P]. 2019-09-16.
YANG Lei, FANG Jiandang, CAO Xuejun. A lock testing device and its testing method: 201910871538.2[P]. 2019-09-16. (in Chinese)
- [16] LI X Y, CHEN W B, KANG R. Performance margin-based reliability analysis for aircraft lock mechanism considering multi-source uncertainties and wear [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 205: 1131-1139.
- [17] 杜国民, 程远升, 张振帮, 等. 一种用于密炼机上的锁紧机构组合系统: 201920946389.7[P]. 2019-06-23.
DU Guomin, CHENG Yuansheng, ZHANG Zhenbang, et al. A combination system of locking mechanism for mixer: 201920946389.7[P]. 2019-06-23. (in Chinese)
- [18] 杨强, 孙志礼, 闫明, 等. 改进 Delta 并联机构运动可靠性分析[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 71-76.
YANG Qiang, SUN Zhili, YAN Ming, et al. Kinematic reliability analysis of improved Delta parallel mechanism [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 71-76. (in Chinese)
- [19] 刘超. 连杆机构运动可靠性及动力学可靠性的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
LIU Chao. Research on dynamic reliability of linkage mechanism [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese)
- [20] 李业农, 施祖康. 机构运动可靠度的研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 38-41.
LI Yenong, SHI Zukang. Research on kinematic reliability of mechanism [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(1): 38-41. (in Chinese)
- [21] SURFACE N. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment[M]. US: AIAA, 1992.
- [22] ZHANG Y G, YU T X, SONG B F. A reliability allocation method of mechanism considering system performance reliability [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2019, 35(7): 2240-2260.
- [23] ZHUANG X C, YU T X, AFSHARI S S, et al. Remaining useful life prediction of a mechanism considering wear correlation of multiple joints [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 1-20.
- [24] 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—science direct [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96: 543-561.
- [25] BO Z, ZHANG Z N, DAI X D. Modeling and prediction of wear at revolute clearance joints in flexible multibody systems [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(2): 317-329.
- [26] WANG G, LIU H. Dynamic analysis and wear prediction of planar five-bar mechanism considering multiflexible links and multiclearance joints [J]. ASME. J. Tribol, 2017, 139(5): 051606.
- [27] JIANG S, CHEN X L, DENG Y. Dynamic response analysis of planar multilink mechanism considering wear in clearances [J]. Shock and Vibration, 2019, 8: 1-18.
- [28] SILVA JR C R ÁDA, PINTAUDE G. Uncertainty analysis on the wear coefficient of Archard model [J]. Tribology International, 2008, 41(6): 473-481.
- [29] ARCHARD J. Wear theory and mechanisms [M]. UK: Wear Control Handbook, 1980.
- [30] 刘志群, 周红, 刘伟, 等. 某型飞机舱门锁机构卡滞可靠性分析 [J]. 机械设计, 2012, 29(12): 39-42.
LIU Zhiqun, ZHOU Hong, LIU Wei, et al. Reliability analysis of cabin door lock mechanism stuck in a certain aircraft [J]. Mechanical Design, 2012, 29(12): 39-42. (in Chinese)
- [31] 庞欢. 飞机典型机构运动功能可靠性建模方法及应用 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
PANG Huan. Reliability modeling of aircraft mechanism motion function and its application [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [32] SONG K L, ZHANG Y G, SHEN L J. Reliability assessment and improvement for aircraft lock mechanism with multiple failure modes [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21: 640-648.

- [33] ZHANG J, WEI X H, YIN Y. Design and simulation analysis of electric drive emergency release system for landing gear lock mechanism [C] // The Proceedings of the 2018 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2018). USA: AIAA, 2019: 2542-2554.
- [34] SHEN L J, ZHANG Y G, SONG K L, et al. Failure analysis of a lock mechanism with multiple dependent components based on two-phase degradation model-science direct [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 104: 1076-1093.
- [35] UICKER J J, DENAVIT J, HARTENBERG R S. An iterative method for the displacement analysis of spatial mechanisms [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1964, 31 (2): 1131-1142.
- [36] ERKAYA S, UBRAHIM U. Experimental investigation of joint clearance effects on the dynamics of a slider-crank mechanism [J]. *Multibody System Dynamics*, 2010, 24(1): 81-102.
- [37] MACHADO M, MOREIRA P, FLORES P, et al. Compliant contact force models in multibody dynamics: evolution of the Hertz contact theory [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 53: 99-121.
- [38] 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 Yaofei, CHEN Jianjun, ZHANG Chijiang, et al. Reliability analysis of kinematic accuracy of elastic crank slider mechanism [J]. *Machine Design and Research*, 2006, 22 (1): 26-28. (in Chinese)
- [39] 易敏. 考虑转动副间隙曲柄滑块机构动力学仿真与可靠性分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. YI Min. Dynamic simulation and reliability analysis of a crank slider mechanism considering the clearance of rotating pairs [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [40] 赖雄鸣, 段吉安, 朱伟. 多因素影响下的连杆机构可靠性分析 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(4): 497-502. LAI Xiongming, DUAN Ji'an, ZHU Wei. Reliability analysis of linkage mechanism affected by multiple factors [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(4): 497-502. (in Chinese)
- [41] 冯蕴雯, 薛小锋, 宋笔锋, 等. 机构卡滞与定位可靠性分析 [J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(9): 1045-1048. FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, SONG Bifeng, et al. Analysis of mechanism stuck and positioning reliability [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(9): 1045-1048. (in Chinese)
- [42] 陶周亮, 黄建新, 汪兰明. 起落架外置回中机构摩擦卡滞原因分析 [J]. *中国新技术新产品*, 2020(6): 69-71. TAO Zhouliang, HUANG Jianxin, WANG Lanming. Analysis of friction stuck in landing gear external retracting mechanism [J]. *China New Technology and New Product*, 2020(6): 69-71. (in Chinese)
- [43] WAGNER U, FRANZ J, SCHWEIKER M, et al. Mechanical reliability of MEMS-structures under shock load [J]. *Microelectronics Reliability*, 2001, 41 (9/10): 1657-1662.
- [44] LI W, SUN R, GAO N, et al. Interior induced fatigue of surface-strengthened steel under constant and variable loading: failure mechanism and damage modeling [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42 (10): 2383-2396.
- [45] HU X, YE W, MA X, et al. A new creep damage assessment method for metallic material under variable load conditions at elevated temperature [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42 (12): 2725-2737.
- [46] QIAN G, LEI W S. A statistical model of fatigue failure incorporating effects of specimen size and load amplitude on fatigue life [J]. *Philosophical Magazine*, 2019, 3: 1-37.
- [47] LIU J Y, XIANG L L, KAN T. The effect of temperature on the bending properties and failure mechanism of composite truss core sandwich structures [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 79: 146-154.
- [48] ZHAO X, NIU X M, SONG Y D, et al. An investigation of the nonlinear creep damage accumulation of different materials: application of a novel damage model [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2022, 45 (2): 530-545.
- [49] MENG H C, LUDEMA K C. Wear models and predictive equations: their form and content [J]. *Wear*, 1995, 181: 443-457.
- [50] FLORES P, AMBROSIO J, CLARO J C P, et al. Kinematics and dynamics of multibody systems with imperfect joints: models and case studies [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [51] MUKRAS S. Computer simulation/prediction of wear in mechanical components [J]. *Advances in Tribology*, 2020 (1/2): 1-15.
- [52] CHEN X L, WANG T, JIANG S. Study on dynamic behavior of planar multibody system with multiple lubrication clearance joints [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2022, 91: 104404.
- [53] CHEN X L, MACHADO T H, CAVALCA K L. Investigation on the influence of the cavitation boundaries on the dynamic behavior of planar mechanical systems with hydrodynamic bearings [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 99: 19-36.
- [54] CHEN X L, JIANG S Y, WANG T. Dynamic modeling and analysis of multi-link mechanism considering lubrication clearance and flexible components [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 107(4): 3365-3383.
- [55] JIANG S, CHEN X L. Reducing undesirable effects of clearances on dynamic and wear of planar multi-link mechanism [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 100(3): 1-29.
- [56] LI B, WANG M S, GANTES C J, et al. Modeling and simulation for wear prediction in planar mechanical systems with multiple clearance joints [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(2): 887-910.
- [57] ZHANG B Y, LIU H J, ZHU C C, et al. Simulation of the fatigue-wear coupling mechanism of an aviation gear [J]. *Friction*, 2021, 9(6): 1616-1634.
- [58] LIU H L, LIU H J, ZHU C C, et al. Study on gear contact

- fatigue failure competition mechanism considering tooth wear evolution[J]. *Tribology International*, 2020, 147: 106277.
- [59] CALABRESE L, PROVERBIO E, GALTIERI G, et al. Effects of ageing on mechanical durability of round clinched steel/aluminium joints[J]. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2014, 9(1): 1-10.
- [60] CALABRESE L, PROVERBIO E, POLLICINO E, et al. Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints [J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2015, 50(1): 10-17.
- [61] LEBOZEC N, LEGAC A, THIERRY D. Corrosion performance and mechanical properties of joined automotive materials[J]. *Materials and corrosion*, 2012, 63(5): 408-415.
- [62] CALABRESE L, BONACCORSI L, PROVERBIO E, et al. Durability on alternate immersion test of self-piercing riveting aluminium joint[J]. *Materials & Design*, 2013, 46: 849-856.
- [63] SUN Q Z, YE Z S, REVIE M, et al. Reliability modeling of infrastructure load-sharing systems with workload adjustment[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 68(4): 1283-1295.
- [64] MA Z H, WANG S P, LIAO H T, et al. Engineering-driven performance degradation analysis of hydraulic piston pump based on the inverse Gaussian process[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2019, 35(7): 2278-2296.
- [65] WANG X, XU D H. An inverse Gaussian process model for degradation data[J]. *Technometrics*, 2010, 52(2): 188-197.
- [66] PAN D H, LIU J B, CAO J D. Remaining useful life estimation using an inverse Gaussian degradation model [J]. *Neurocomputing*, 2016, 18(5): 64-72.
- [67] LIU B, XIE M, KUO W. Reliability modeling and preventive maintenance of load-sharing systems with degrading components[J]. *IIE Transactions*, 2016, 48(8): 699-709.
- [68] PANG H, WANG N, YU T X. Research on failure mechanism and reliability of aircraft lock mechanism [M]. US: CRC Press, 2018: 2099-2107.
- [69] 韩铭. 结构动强度可靠性评估的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- HAN Ming. Research on dynamic strength evaluation of structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [70] 林富甲. 结构可靠性[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1991.
- LIN Fujia. Structural reliability [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1991. (in Chinese)
- [71] 顾长鸿, 盛一兴, 张树林. 飞机起落架上位锁机构可靠性分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 1995, 21(4): 18-23.
- GU Changhong, SHENG Yixing, ZHANG Shulin. Reliability analysis of upper locking mechanism of aircraft landing gear [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1995, 21(4): 18-23. (in Chinese)
- [72] 冯蕴雯, 国志刚, 宋笔锋. 如何确保飞机起落架收放锁系统的可靠性[J]. *西北工业大学学报*, 2005, 23(2): 171-175.
- FENG Yunwen, GUO Zhigang, SONG Bifeng. How to ensure the reliability of landing gear retraction lock system [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2005, 23(2): 171-175. (in Chinese)
- [73] 朱晓宁, 李田因, 钟声. 飞机起落架上下位一体锁式收放机构的设计研究[J]. *机械工程师*, 2013(11): 138-139.
- ZHU Xiaoning, LI Tiannan, ZHONG Sheng. Design and research of aircraft landing gear up and down integrated lock retraction mechanism [J]. *Mechanical Engineer*, 2013(11): 138-139. (in Chinese)
- [74] 敖文伟, 裴华平, 陈红. 飞机起落架作动筒内锁研究与分析[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(1): 130-134.
- AO Wenwei, PEI Huaping, CHEN Hong. Research and analysis on inner lock of aircraft landing gear actuator barrel [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(1): 130-134. (in Chinese)
- [75] 何国伟, 许海宝. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- HE Guowei, XU Haibao. Reliability test technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [76] WANG H, SONG B F, YU T X. Investigation on experimental motion reliability based on simulation system for mechanism the multibody simulation model [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(5): 1005-1011.
- [77] STEFANOU G. The stochastic finite element method: Past, present and future [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2009, 198(9/12): 1031-1051.
- [78] JIANG C, ZHENG J, HAN X. Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: a review [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 57: 2485-2502.
- [79] DONG X, YE J, HU X F. Kinetic uncertainty analysis of the reheat-stop-valve mechanism with multiple factors [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(11): 1745-1765.
- [80] ZHANG L, ZHANG J G, ZHAI H, et al. A new assessment method of mechanism reliability based on chance measure under fuzzy and random uncertainties [J]. *Eksplatacja i Niezawodnosć-Maintenance and Reliability*, 2018, 20(2): 219-228.
- [81] ZHANG L, ZHANG J G, YOU L F, et al. Reliability analysis of structures based on a probability-uncertainty hybrid model [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2019, 35(1): 263-279.
- [82] ZHANG L, ZHANG J G. Uncertain process-based reliability and maintenance modeling for systems under mutually dependent degradation and shock processes [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2021, 37(8): 3638-3660.
- [83] NIRMALA K, BABU K S, REDDY K H. Design and optimization of mechanical components and its Mechanism using Monte Carlo simulation [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2017, 3(6): 675-680.

- [84] ZHOU S, ZHANG J G, YOU L F, et al. Uncertainty propagation in structural reliability with implicit limit state functions under aleatory and epistemic uncertainties[J]. *Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability*, 2021, 23(2): 231-241.
- [85] LI X Y, WU J P, LIU L, et al. Modeling accelerated degradation data based on the uncertain process[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 27(8): 1532-1542.
- [86] LUO H T, ZHAO J S. Synthesis and kinematics of a double-lock overconstrained landing gear mechanism[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 121: 245-258.
- [87] BAI S P. Geometric analysis of coupler-link mobility and circuits for planar four-bar linkages[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 118: 53-64.
- [88] LI X G, WEI S M, LIAO Q Z, et al. A novel analytical method for function generation synthesis of planar four-bar linkages[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 101: 222-235.
- [89] SUN D Y, CHEN G P. Kinematic accuracy analysis of planar mechanisms with clearance involving random and epistemic uncertainty[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2016, 58: 256-261.
- [90] 闵剑青, 徐梓斌. 基于SimMechanics的平面四杆机构运动分析与仿真[J]. *轻工机械*, 2004(1): 40-41.
MIN Jianqing, XU Zhibin. Motion analysis and simulation of planar four-bar mechanism based on SimMechanics[J]. *Light Industry Machinery*, 2004(1): 40-41. (in Chinese)
- [91] 庞和喜, 曹鸿钧. 基于SimMechanics和iSIGHT的平面四杆机构的运动仿真和优化[J]. *机械传动*, 2008, 32(4): 46-48.
PANG Hexi, CAO Hongjun. Motion simulation and optimization of planar four-bar mechanism based on SimMechanics and iSIGHT[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2008, 32(4): 46-48. (in Chinese)
- [92] 刘龙, 黎炯宏. 基于MATLAB的平面四连杆机构运动仿真[J]. *机电工程技术*, 2011, 40(4): 51-53.
LIU Long, LI Jionghong. Motion simulation of planar four-bar mechanism based on MATLAB[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2011, 40(4): 51-53. (in Chinese)
- [93] 徐艳妮. 基于MATLAB的平面连杆机构综合与分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
XU Yanni. Analysis of planar linkage mechanism based on MATLAB[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [94] HRONES J A, NELSON G L. Analysis of the four-bar linkage: its application to the synthesis of mechanisms[M]. US: Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [95] 黄玮, 冯蕴雯, 吕震雷, 等. 考虑铰链运动副间隙的机构运动可靠性分析模型[J]. *机械强度*, 2007, 29(2): 264-268.
HUANG Wei, FENG Yunwen, LYU Zhenzhou, et al. Kinematic reliability analysis model of mechanism considering clearance of kinematic pair[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(2): 264-268. (in Chinese)
- [96] 顾井峰, 冯蕴雯, 冯元生. 任意空间四连杆机构运动精度及其可靠性分析[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(5): 814-817.
GU Jingfeng, FENG Yunwen, FENG Yuansheng. Kinematic accuracy and reliability analysis of arbitrary space four-link mechanism[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2012, 31(5): 814-817. (in Chinese)
- [97] 陆凤仪, 徐格宁, 董炜. 平面连杆机构运动误差及可靠性分析[J]. *起重运输机械*, 2003(4): 25-27.
LU Fengyi, XU Gening, DONG Wei. Kinematic error and reliability analysis of planar linkage mechanism[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2003(4): 25-27. (in Chinese)
- [98] SUN Z C, YU T X, CUI W M, et al. A simulative reliability trial method for mechanism based on multi-factors coupling[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(11): 1516-1522.
- [99] SHI Y, SONG B F, YU T X, et al. Kinetic reliability analysis of space four-links mechanism considering wear[C]// 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). US: IEEE, 2016: 1-11.
- [100] WANG N F, WEI S, ZHANG X M. Optimization design for linkage mechanism based on reliability of kinematic accuracy[C]// 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Guangzhou: IEEE, 2012: 4-15.
- [101] LI C, WANG B C, HAN X, et al. A method used for mechanisms motion accuracy reliability analysis[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 945-949: 1069-1072.
- [102] JING H L, ZHAO H L, WANG T J. Investigation of aircraft hatch door motion accuracy reliability considering hinges abrasion[J]. *Journal of Machine Design*, 2011, 28(4): 55-59.
- [103] ZHUANG X C, YU T X, SUN Z C, et al. Simulation of wear for revolute joint experiencing periodic load of a gear door lock[C]// ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2016, 41: 19-27.
- [104] WANG X P, LIU G. Modeling and simulation of revolute joint with clearance in planar multi-body systems[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29: 4113-4120.
- [105] JIANG S, CHEN X L, DENG Y. Dynamic response analysis of planar multilink mechanism considering wear in clearances[J]. *Shock and Vibration*, 2019, 9: 1-18.
- [106] 朱利媛, 陈雷, 孙英超, 等. 折叠翼弹簧锁紧机构动力学仿真分析[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(s1): 72-75.
ZHU Liyuan, CHEN Lei, SUN Yingchao, et al. Dynamic simulation analysis of spring locking mechanism for folding-wing[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(s1): 72-75. (in Chinese)
- [107] GENG X Y, LI M, LIU Y F, et al. Non-probabilistic kinematic reliability analysis of planar mechanisms with non-uniform revolute clearance joints[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 140: 413-433.

- [108] CAMPISANO F, REMIREZ A A, CALÓ S, et al. Online disturbance estimation for improving kinematic accuracy in continuum manipulators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2): 2642-2649.
- [109] GAO Y, ZHANG F, LI Y Y. Reliability optimization design of a planar multi-body system with two clearance joints based on reliability sensitivity analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(4): 1369-1382.
- [110] LAI X M, LAI Q F, HUANG H, et al. New approach to assess and rank the impact of revolute joint wear on the kinematic accuracy in the low-velocity planar mechanism[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 102: 71-82.
- [111] CHEN X, GAO S. Dynamic accuracy reliability modeling and analysis of planar multi-link mechanism with revolute clearances[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2021, 90: 1-17.
- [112] ZHAO Q Q, GUO J K, ZHAO D T, et al. A novel approach to kinematic reliability analysis for planar parallel manipulators[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2020, 142(8): 1-34.
- [113] CHANEKAR P V, FENELON M, GHOSAL A. Synthesis of adjustable spherical four-link mechanisms for approximate multi-path generation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 70: 538-552.
- [114] CHANEKAR P V, GHOSAL A. Optimal synthesis of adjustable planar four-bar crank-rocker type mechanisms for approximate multi-path generation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 69: 263-277.
- [115] LIANG H, GUO L Z, LIN H Q, et al. Wear characteristics of cabin door lock mechanism under constant amplitude pressure[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 841: 131-139.
- [116] DHILLON B S. Stress-strength reliability models[J]. *Microelectronics Reliability*, 1980, 20(4): 513-516.
- [117] 吕震宙. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
LYU Zhenzhou. Reliability and reliability sensitivity analysis of structural mechanisms[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [118] LIU Z Q, ZHOU H, LIU W, et al. Seizure reliability analysis of lock machine for aircraft hatch door[J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(12): 39-43.
- [119] XU K, YIN Y, YANG Y X, et al. Kinematic singularity and bifurcation analysis of sidestay landing gear locking mechanisms[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 46: 325-329.
- [120] KNOWLES J A, LOWENBERG M H, NEILD S A, et al. A bifurcation study to guide the design of a landing gear with a combined uplock/downlock mechanism[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 341: 1157-1163.
- [121] SONG K L, ZHANG Y G, ZHUANG X C, et al. An adaptive failure boundary approximation method for reliability analysis and its applications[J]. *Engineering with Computers*, 2021, 37: 2457-2472.
- [122] 贾洁羽, 崔卫民, 张玉刚, 等. 飞机舱门锁机构多失效模式可靠性分析方法[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(4): 524-531.
JIA Jieyu, CUI Weimin, ZHANG Yugang, et al. Reliability analysis method of aircraft hatch lock mechanism with multi-failure modes[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(4): 524-531. (in Chinese)
- [123] SONG K L, ZHANG Y G, YU X S, et al. A new sequential surrogate method for reliability analysis and its applications in engineering[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 60555-60571.
- [124] YE Z S, REVIE M, WALLS L. A load sharing system reliability model with managed component degradation[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2014, 63(3): 721-730.
- [125] LIU L, LI X Y, ZHANG W, et al. Fuzzy reliability prediction of rotating machinery product with accelerated testing data[J]. *Journal of Vibro Engineering*, 2015, 17(8): 4193-4210.
- [126] SUN F Q, LIU J C, LI X Y, et al. Reliability analysis with multiple dependent features from a vibration-based accelerated degradation test[J]. *Shock and Vibration*, 2016, 135: 119-123.
- [127] SHEN L J, ZHANG Y G, SONG B F, et al. Reliability evaluation and importance analysis of structural systems considering dependence of multiple failure modes[J]. *Engineering with Computers*, 2020, 38: 1053-1070.

作者简介:

江德印(1995-),男,博士研究生。主要研究方向:复杂机械系统可靠性、安全性分析。

韩雅洁(1999-),女,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构可靠性分析与设计。

陈天昱(1999-),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构可靠性分析与设计。

江书海(1997-),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构可靠性分析与设计。

崔卫民(1969-),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器结构/机构可靠性分析、设计与试验技术。

(编辑:马文静)