

基于 DELMIA 的民机内饰虚拟维修仿真与评价方法

陈登凯, 王瑶, 敖卿, 钱军

(西北工业大学 工业设计与人机工效工信部重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 针对传统民机内饰维修困难且成本大的问题, 构建民机虚拟维修仿真与评价体系, 提出基于 DELMIA 的虚拟维修仿真与评价优化方法。**方法** 首先对维修任务仿真动作进行分解, 并对维修操作阶段进行划分, 根据不同阶段动作进行特性分析, 完成操作区的划分; 其次针对不同区域再次进行维修动作类型的划分, 按照不同类型分别进行虚拟仿真操作; 再次基于 DELMIA 仿真结果中提取的关键帧进行各指标分析, 得到单项评估的结果; 最后基于 MATLAB 平台完成上述多种人机因素的综合评估权重向量并计算出各关键帧结果, 输出人机工效综合评估可视图和报告, 给出可优化方向。**结果** 依靠项目支撑对某型号民机内饰行李箱维修仿真进行案例验证, 表明该方法能够系统地完成民机内饰典型部件的维修仿真分析任务, 并给出明确的维修优化方向。**结论** 新方法体系的提出有助于民机内饰虚拟维修仿真的效率及综合评估可靠性的提高。

关键词: 民机内饰; 虚拟维修; 仿真分析; 综合评估; 人机工效

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)14-0073-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.14.007

Simulation and Evaluation Optimization Method of Civil Aircraft Interior Virtual Maintenance Based on DELMIA

CHEN Deng-kai, WANG Yao, AO Qing, QIAN Jun

(Key Laboratory of Industrial Design and Ergonomics, Ministry of Industry and Information
Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a virtual maintenance simulation and evaluation optimization method based on DELMIA to construct a virtual maintenance simulation and evaluation system for civil aircraft so as to solve the difficulty and high cost of traditional civil aircraft interior maintenance. First, the maintenance task simulation actions were decomposed and the maintenance operation stages were divided, and the characteristics of the actions in different stages were analyzed to complete the division of the operation area. The maintenance action types were divided again for different areas, and virtual simulation operations were performed according to different types. The evaluation was based on the key frames extracted from the DELMIA simulation results to analyze the indicators to obtain the results of single evaluation. Finally, based on the MATLAB platform, the comprehensive evaluation weight vector of the above-mentioned various ergonomic factors was completed, the results of each key frame were calculated, the visual diagram and report of the comprehensive evaluation of ergonomics were output, and the optimization direction was given. The case verification of maintenance simulation of a certain type of civil aircraft interior luggage based on the project support showed that the method can systematically complete the maintenance simulation analysis task of typical interior components of civil aircraft, and give a clear maintenance optimization direction. The new method system is helpful to improve the efficiency and comprehensive evaluation reliability of civil aircraft interior virtual maintenance simulation.

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金项目(22GH030706); 陕西省特支计划领军人才项目(W099115); 陕西省特支哲社领军项目(D5113200021)

作者简介: 陈登凯(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工业设计、人机工程学、产品创新设计。

通信作者: 王瑶(1999—), 女, 硕士生, 主攻人机工程学、布局评估。

KEY WORDS: internal components of civil aircraft; virtual maintenance; simulation analysis; comprehensive evaluation; ergonomics

虚拟维修技术是一种可靠性高、不受空间和场地的限制、可多次反复使用、成本较低的技术。从国内发文机构来看,对虚拟维修研究较多的主要是中国石油大学等院所,能够应用于民机维修等很多领域。因此,许多国家都高度重视虚拟维修技术的发展^[1-2]。虚拟维修技术的广泛性应用,不仅有助于产品维修工作,还覆盖了产品全生命周期的各个阶段^[3]。在民机中,飞机内饰结构的维护是飞机内饰设计不可或缺的部分。传统的维修方法存在耗时耗力的缺点,而虚拟仿真技术的应用能够高效地完成飞机内饰结构的安装、拆卸和维修工作。虚拟维修技术是民机维修评估的重要技术手段之一。它基于现代技术,在虚拟环境中模拟维修过程,还能够评估维修时的可视域、可达域维修时间及维修难易度等因素^[4]。从维修人员的角度出发,虚拟维修技术不仅能够提高维修人员的作业效率,还能提升维修人员的舒适度及操作的便捷性。通过对具体飞机内饰维修过程中的维修行为动作进行全面分析,虚拟仿真技术还能提高仿真的可靠性和准确性,从而在实际维修中得到应用。

本文以构建民机虚拟维修的仿真及评价体系为出发点,提出了一套虚拟仿真及人机工效综合评估方法。通过实例验证,展示了基于 DELMIA 的民机内饰虚拟维修仿真及评价方法的创新性。该方法为民机内饰的维修任务提供了一种新颖的仿真及评价方法,并为后续民机内饰的维修保障分析和维修辅具设计等工作提供了基础数据和指导。

1 民机内饰虚拟维修理论与方法

民机内饰工程维修技术研究根据当前内饰工程维护的现状、不足及趋势,提出针对民机内饰工程维修及评估方法,主要针对内饰中各个模块化部件进行研究。结合国内外相关文献,发现关于民机维修的关键技术可以分为维修任务仿真技术及维修任务评估技术两大类。对民机内饰维修而言,其工程维护综合评价指标体系主要包括维修作业舒适度、维修操作过程评估以及维修适航评估。相对于其他维修任务,民机内饰维修对维修人员体力负荷、作业姿势、作业布局、维修件、维修通道操作的可行性有更高的要求。此外,民机内饰维修更加注重标准化、互换性及模块化这三个方面的适航性评估。

1.1 虚拟维修仿真实论

目前,虚拟维修的主要方法是基于虚拟维修模型、资源、场景,根据仿真方案完成仿真^[5]。在仿真场景中,常使用 DELMIA 软件进行虚拟维修仿真,

该软件支持任务行为的建立,能够实现连续的动作仿真,并完成各种分析任务,因此被广泛认可作为可靠的虚拟维修平台^[6]。国内外学者在虚拟仿真维修方面进行了大量的研究,其中 Numfu 等^[7]、Ronan 等^[8]借助第三方系统捕捉动作数据,实时驱动虚拟人进行仿真,但该方法收到精度及硬件性能的限制。徐丙立等^[9]、Deng 等^[10]通过采集真实动作的数据,建立参数化模型来生成人体动作,以实现仿真,但该方法存在对象的约束。此外,爱荷华大学 Vujoservic 等^[11]提出维修任务分解的思想,将维修作业进行不同层次的分解,以便于维修仿真。类似地,李星新等^[12]借助人因工程中动素的分类方法及维修操作仿真,建立维修动素库,以便于维修数据的提取。

1.2 虚拟维修评估方法

随着技术的飞速发展,民机的功能变得越来越多样化,同时也变得更加复杂。它们逐渐呈现出高技术、大风险、高要求的特点^[13-14]。尽管装配自动化程度提高,但在没有人参与下,仍然无法实现全自动化工作。为保证正常运行,仍需要操作人员的参与来保证操作的有效进行。然而,现代维修作业中维修人员需要承担潜在的设计、制造及安装缺陷,同时受到维修空间的限制,容易产生巨大的生理疲劳和心理负担。因此,维修性评估的主要对象是维修人员。通过使用人机工效学的理论知识,可以确保维修工人在民机维修的设计中能够高效、安全和准确地开展维修活动。虚拟维修评估的主要出发点是视野可见性、维修操作可达性、安全性和舒适性等方面。Lu 等^[15]很早就基于虚拟环境下民用飞机维修评估的方法和技术进行了研究,并提出了分析评价结果和修改建议。周栋等^[16]建立的维修安全评估模型可对潜在的安全影响因素进行分析预测,此外,许多研究人员还基于仿真环境开展了维修性评价方法的研究^[17-18]。

对现有的维修操作人机工效评估流程,通常是通过设定虚拟人维修操作位置,并定义一些典型的维修操作姿态,然后对每个姿态下的人机因素进行分析。然而,这些方法往往只对单个指标进行分析,并没有考虑到在实际维修中多个指标综合分析的可靠性提升。此外,维修任务是一个动态的多姿态过程,应该综合考虑各个姿态,进行综合评估,以提高维修综合评估的可靠性。

2 民机内饰维修仿真及评估流程

本文提出了一种民机内饰虚拟维修仿真及评估方法,具体流程可分为以下 5 个步骤,见图 1。

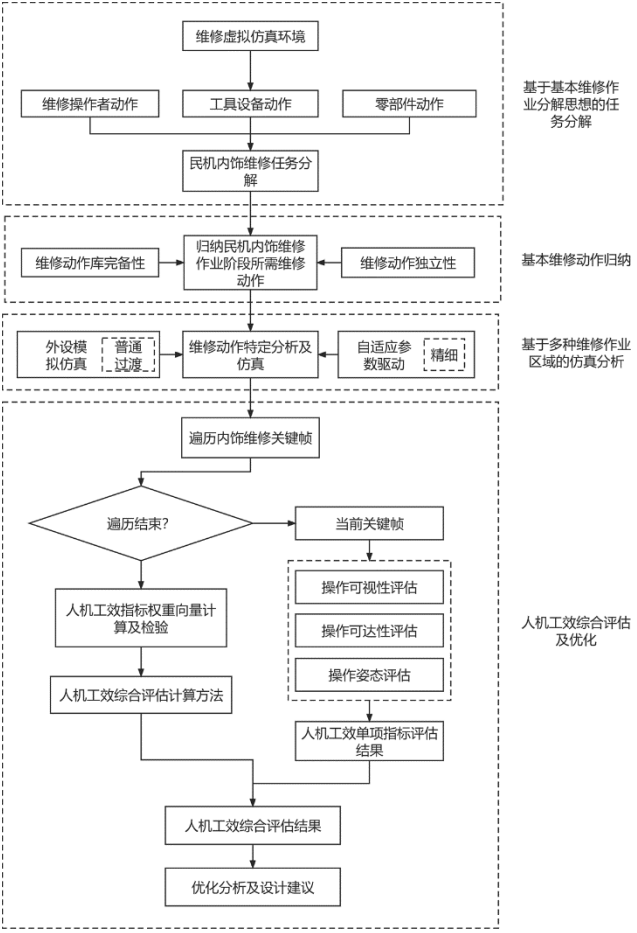


图 1 民机内饰维修仿真评估优化流程
Fig.1 Civil aircraft interior maintenance simulation evaluation and optimization process

- 1) 依据民机内饰的基本维修作业分解思想，对民机维修操作者本身动作、工具设备的动作、零部件动作等进行分解。
- 2) 综合考虑民机维修动作库的完备性、可靠性以及单个维修动作设计的独立性的基础上，划分民机内饰维修作业阶段，并总结归纳各个阶段所需要的维修动作。
- 3) 根据实际维修作业过程中操作动作的特点，确定适合的维修仿真方法，并进行维修仿真。
- 4) 遍历维修关键帧，输出对应民机维修操作人员的可视性评估、可达性评估、姿态舒适度评估。
- 5) 进行指标权重分配，输出综合评估结果，并对仿真问题进行总结，提出优化建议。

2.1 基本维修作业驱动下的虚拟仿真方法

2.1.1 维修作业分解

维修作业是维修人员完成维修的全部活动过程的总和，包括了所有的基本维修作业。对基本维修作业，其作为维修作业的子集，是一项维修活动中分解出的多个任务子集中的一个^[19]。在民机内饰维修中基本维修作业可以分解为 DELMIA 环境中的虚拟人维修操作动作、维修操作的工具设备动作、维修操作的

民机内饰零部件的动作，虚拟人的维修动作包含姿态的调整和方位的转换，姿态调整则包含了上肢运动、弯腰、扭头等，方位转换则包含了步行、转身、下楼梯等。然而民机内饰维修是由民机内饰装配约束、内饰环境约束及操作者本身的生理特点共同决定的，而在民机维修时使用工具和操作对象也会对操作者动作存在影响。而维修人员作为维修动作的发起者和执行者，直接或间接主导其他对象，其操作动作直接决定了维修仿真效率。

2.1.2 维修动作归纳

民机内饰维修的动作库集成了所有的维修动作，其完备性及可靠性是最主要的，即任何民机内饰部件维修作业都可以在维修动作库里找到相应的维修动作，其多种维修动作组合构成某特定维修作业。同时动作库中的每个动作为保证其能够有序组合，实现仿真效率的提高，每个动作都应该拥有独立性，如在拆卸民机内饰座椅时，拧螺丝、拆卸椅背等动作都具有其特定的含义。

对民机维修基本维修作业的流程进行详细划分，并根据分段区域进行各自基本维修作业动作的划分，将基本维修作业流程划分为准备、执行和结束三个阶段，其各自对应的基本维修作业动作见表 1。

表 1 基本维修作业三个阶段的基本维修动作
Tab.1 Basic maintenance actions in three stages of basic maintenance operations

作业阶段	名称	含义
准备阶段	抓取	不借助工具将对象抓离原对象所处位置
	移动	通过人体部位变动将对象从当前位置移动至作业位置的动作过程
	释放	将抓取的对象放开，使得其与身体不再有接触和联系
	变换	改变人体原有的姿势动作但并未进行空间内的移动
执行阶段	拧出	使用工具将旋入部件从原嵌入对象中拧出，保证二者完全脱离接触
	拧紧	使用工具将旋入部件在原嵌入对象中拧紧，保证二者完全接触
	插入	将物体插入到另外一个物体中，保证二者完全接触
	拔出	将物体从另外一个物体中拔出，保证二者完全脱离接触
	装上	不借助任何工具将物体装配到某一特定位置
	旋入	不借助任何工具将物体的螺纹部分旋入螺孔中
	旋出	不借助任何工具将物体的螺纹部分旋出螺孔中
结束阶段	敲打	借助工具进行敲击，实现物体的完全接触
	其他	……
结束阶段	同准备阶段	

2.1.3 面向虚拟仿真的动作特性分析与归类

基于民机内饰维修作业任务的基本维修动作进行特性分析,再结合 DELMIA 软件特点,可将虚拟维修操作区划分为局部操作区和整体操作区,维修动作可分为精准参数维修动作、普通维修动作、过渡维修动作三种类型。

局部操作区主要指不需要借助人体方位的转换即可进行操作的范围。在此区域内主要存在两种维修动作类型,普通维修动作和精准维修动作。普通维修动作是指不需要依赖具体参数数据,仅通过维修工作者自身的经验或仅需要大概约束定位就可以完成的动作。例如在民机维修时维修人员可以凭借自身经验抓取工具,不用参数定位(仅需在避免碰撞干涉的情况下)就可以完成工具至对象的定位。精准维修动作则需要当维修人员将工具与对象进行匹配后,保证精准的轴线对齐及参数定位方可进行拆卸、拧出、拧紧等一系列操作。

整体操作区主要是指需要借助人体方位的转换才可以进行操作的范围。针对这一操作区主要因为民机上存在多处连接,在拆卸时需要进行位置的调整才可以完成,所以在此类过程中则需要进行人体方位的转换,由此也会存在一系列动作,本文将之称为过渡维修工作。例如民机行李箱门拆卸时,左右两侧皆有螺母,维修人员则需要在完成左侧部位拆卸后,调整姿态移动至右侧完成右侧部位的工作,这中间阶段的动作则属于过渡维修动作。

针对以上三种维修动作类型,基于 DELMIA 软件本身选取适合各自特点的仿真方法。外设模拟仿真和自适应参数驱动两种仿真方法分别应用于普通、过渡和精准维修动作中进行仿真分析。外设模拟仿真方法即主要通过观察真实民机维修人员的交互行为来指导虚拟仿真操作者进行维修仿真动作设置,例如,路径到达规划时真实维修人员则会避免碰撞及干涉,选择最方便高效的方法完成位置的调整。自适应参数驱动仿真方法主要是针对 DELMIA 软件中可直接定位到轴线处、设置转动、移动等参数,确保精确定位的特征,再通过实际零件装配的尺寸来计算参数,将其应用于精准维修动作中可以保证仿真的精确性。

2.2 面向民机维修的人机工效综合评估方法

在完成一系列仿真流程后,全面的综合评估方法能够全面真实地反映维修过程的评估结果。首先,在虚拟仿真环境中对维修任务进行模拟仿真,将实际维修作业的详细信息通过虚拟环境进行还原,随后对整个维修任务操作的全过程进行三种不同类型的作业分段;其次,依次对每一段的维修作业的关键帧进行提取,得到任务过程中维修人员的操作可达性、操作可视性、快速上肢的分析,并进行单项评估的结果总

结;最后,基于权重计算和分配综合得出上述三种人机因素的综合评估,输出人机工效综合评估可视图和报告,根据结果提出可优化方案。

2.2.1 单项指标评估。

单项指标评估将采用定量化对比的方式。本文案例验证中主要针对维修人员可视域、可达域、RULA 姿态评估进行分析,因此,单项指标评估以这三种为主。

可视域评估主要是基于民机内饰维修任务中维修过程的关键帧进行分别量化,量化分数范围为 1~3,主要根据当前操作区域是否属于最佳可视域范畴,若属于则为 1,处于一般可视域范围则为 2,处于较差可视域范围则为 3。可达域评估类比可视域。RULA 姿态评估则主要根据姿态分析评价分数自动生成各关键帧数值。

2.2.2 综合指标评估

步骤 1: 判断单项指标评估中的各个指标两两之间的重要程度,分为 6 级,含义分别为,1-不太重要;2-同等重要;3-略微重要;4-一般重要;5-相当重要;6-极端重要。

步骤 2: 构造各个人机因素之间的权重矩阵。 m_{v-r} 为可视性相对舒适度重要度, m_{v-a} 为可视性相对可达性重要度, m_{r-a} 为舒适度相对于可达性重要度,构造的权重矩阵见式(1)。

$$A = \begin{pmatrix} 1 & m_{v-a} & m_{v-r} \\ 1/m_{v-a} & 1 & m_{a-r} \\ 1/m_{v-r} & 1/m_{a-r} & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

步骤 3: 计算人机因素的权重向量。核心程序如下所示:

```
A=input(A);
[x,y]=eig(A);
eigenvalue=diag(y);
lamda=max(eigenvalue);
for i=1:length(A)
if lamda=eigenvalue(i)
y_lamda=x(:,i)
CI=(lamda-3)/2;
RI=0.45;
CR=CI/RI;
if CR<0.1
最后得到最大特征值对应的特征向量即 y_lamda。
```

步骤 4: 计算人机工效综合评价分数。 W_{total} 反映了当前评估关键帧的人机交互性能, W_{vision} , W_{rula} , W_{access} 分别反映了当前评估关键帧对应的可视、可达、RULA 分析的人机交互性能,见式(2)。

$$W_{total} = L \times (W_{vision}, W_{rula}, W_{access})^T \quad (2)$$

式中, L 为 y_lamda 。

步骤 5: 根据综合分数生成的图表总结维修过程

中的问题及可优化的方向。

3 案例应用——以某民机型号行李箱为例

本文提出的面向民机内饰维修的虚拟仿真和评估方法可应用于民机维修，具有一定的普适性，本文选取课题项目中的某民机型号为例，验证此方法面向民机内饰维修的可行性。

3.1 民机行李箱维修作业驱动下的虚拟仿真

以飞机客舱行李箱的拆卸为案例，利用 DELMIA 软件进行仿真维修，DELMIA(Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) 是法国达索系统公司 (Dassault Systemes) 的一款数字化企业的互动制造应用软件。基于 DELMIA 软件平台，一是通过人体任务仿真 (Human Task Stimulation) 模块创建、验证及模拟维修人员的人体活动，如抓取、放置、攀爬等；二是构建飞机客舱行李架的虚拟维修场景，Insert (插入) 某型号飞机客舱内饰模型和维修工具。利用 DELMIA 的 Human Builder(人体建模)

模块创建拟维修人员模型，在选项卡中设置详细信息，如人群、性别、百分位数及参考点等；三是为增加维修仿真过程的可靠性和真实性，当飞机客舱模型、维修工具导入到 DELMIA 且建立维修人员人体模型后，通过建立手与螺丝刀的约束及 Posture Editor 模块完成精准姿势的调整，还原真实的飞机客舱维修场景。

完成仿真准备后，按照本文提出的方法对某民机型号行李箱门的维修进行验证，箱门的主要拆卸点为左右两侧 8 个点位的螺钉，见图 2。

步骤 1：首先对箱门作业任务进行分解。主要包含打开箱门动作、拆卸左侧螺钉、固定已拆卸箱门、下楼梯、移动楼梯、上楼梯、拆卸右侧螺钉、拆卸箱门。

步骤 2：基于基本的维修作业过程进行阶段划分、动作归纳，同时根据基本维修动作的动作匹配定义仿真维修动作，见表 2。

步骤 3：针对不同维修动作定义进行虚拟仿真，并在此基础上生成了动态仿真视频，对箱门在虚拟仿真过程中的关键帧截取，见图 3。

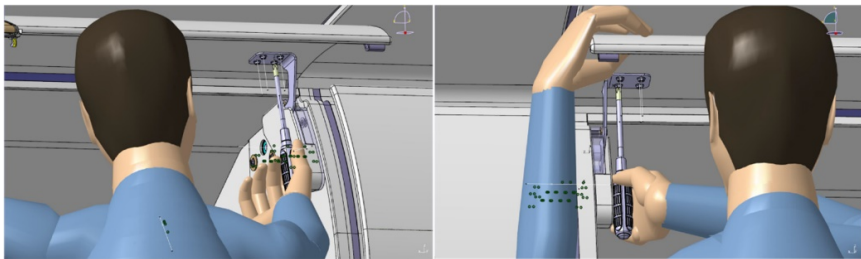


图 2 箱门维修主要拆卸点
Fig.2 Main dismantling points for door maintenance

表 2 箱门基本维修作业过程细化
Tab.2 Refinement of basic maintenance operation process of the trunk door

作业过程	作业阶段	基本维修动作	维修动作定义	任务类型
打开箱门	准备阶段	抓取螺丝刀	过渡维修动作	操作者动作
		调整姿态准备打开箱门	普通维修动作	操作者动作
	执行阶段	打开箱门	精细维修动作	零部件动作
	结束阶段	调整姿态过渡至拆卸螺钉姿势	过渡维修动作	操作者动作
拆卸左侧螺钉	准备阶段	移动螺丝刀到拆卸螺钉下方准备拆卸	过渡维修动作	操作工具动作
		释放螺丝刀调整人体手部姿势	过渡维修动作	操作者动作
		抓取螺丝刀移动至拆卸螺钉处，释放螺丝刀，准备拆卸	普通维修动作	操作工具动作
		抓取螺丝刀定位至螺钉处	精细维修动作	操作者动作
	执行阶段	拧出螺钉	精细维修动作	零部件、工具动作
		释放螺丝刀、螺钉	普通维修动作	操作者动作
		重复操作执行阶段动作，直至螺钉拧出		
	结束阶段	卸下螺钉移动至左手	过渡维修动作	零部件、工具动作
		调整姿态过渡至拆卸下一个螺钉	过渡维修动作	零部件、工具动作
重复操作拆卸螺钉任务，卸下左侧螺钉				
固定已拆卸箱门左侧	准备阶段	调整姿态准备固定左侧箱门	普通维修动作	操作者动作
	执行阶段	抓取左侧箱门	精细维修动作	操作者动作
	结束阶段	保持姿态至右侧螺钉拆卸完成	过渡维修动作	操作者动作

续表 2				
作业过程	作业阶段	基本维修动作	维修动作定义	任务类型
下楼梯	准备阶段	调整姿势准备下楼梯	过渡维修动作	操作者动作
	执行阶段	下楼梯	过渡维修动作	操作者动作
	结束阶段	调整姿势过渡至搬运楼梯动作	过渡维修动作	操作者动作
	准备阶段	抓取楼梯	普通维修动作	操作者动作
	执行阶段	行走至右侧	精细维修动作	操作者动作
	结束阶段	调整姿势过渡至上楼梯	过渡维修动作	操作者动作
上楼梯	由下楼梯基本维修动作同理可得上楼梯维修作业流程			
拆卸右侧螺钉	基本维修动作流程动作与拆卸左侧螺钉相同			
拆卸箱门	准备阶段	操作者抓取箱门移动至合适位置	普通维修工作	操作者动作
		操作者调整姿态准备	过渡维修动作	操作者动作
	执行阶段	操作者向后行走动作	普通维修动作	操作者动作
		拆卸箱门	精细维修动作	零部件动作
	结束阶段	操作者调整姿态至站立状态	过渡维修动作	操作者动作
		操作者调整姿态至放松状态	过渡维修动作	操作者动作

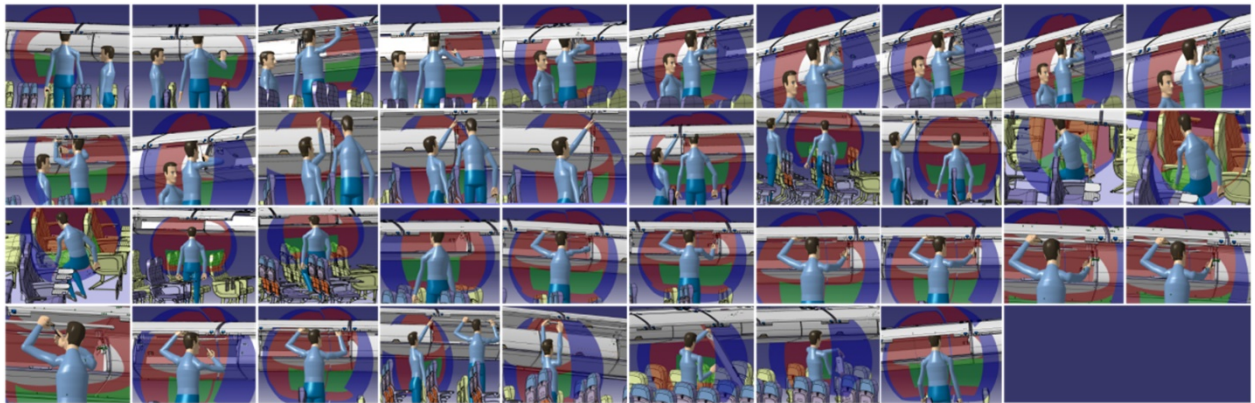


图 3 基于 DELMIA 软件的某民机型号行李箱门虚拟维修关键帧

Fig.3 Screenshot of key frames of virtual maintenance of trunk door of a civil aircraft model based on DELMIA software

3.2 面向某民机型号行李箱门维修的人机工效综合评估

根据面向维修过程的人机功效综合评估方法,通过在 DELMIA 平台中来完成虚拟仿真环境中的维修任务仿真,将民机内饰实际维修作业的详细信息通过虚拟环境进行还原,随后对整个内饰维修任务操作的全过程进行三种不同类型的作业分段,基于每一段维修作业过程,根据基本维修动作选取关键帧进行量化分析。

步骤 1: 为了得到单项指标量化结果,遍历维修过程获取了 38 个关键帧,如图 4 所示为部分关键帧指标,分别记录多个关键帧的不同指标量化数值,生成可视、可达、姿态分析结果,如图 5 所示,纵坐标为量化后的维修评估等级分数(0~7),评分等级越高,则不舒适度越强。

步骤 2: 建立各个人机因素之间的权重矩阵。根据舒适度重要度等级,确定可视性、可达性、舒适度的相对等级,生成权重矩阵,见式(3)。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

(3)

步骤 3: 利用 MATLAB 进行各个人机因素的权重向量计算,并完成一致性检验。

代入权重矩阵得到最大特征值对应的特征向量为(0.910 6 0.371 5 0.150 6)。

步骤 4: 计算人机工效综合评价分数,整理得到拆卸箱门的人机工效综合评价,见图 6。

从拆卸箱门的人机工效综合评价图来看,维修过程中的 0~7 等级,等级 3 占比最大,在移动楼梯、上下楼梯以及拆卸右侧螺钉阶段出现等级评分为 4 和 5 的情况,同时在各阶段对应的关键帧评分等级占比中,拆卸左侧螺钉等级 3 占 75%的比例、等级 2 占 25%的比例;固定箱门等级 3 占 67%的比例、等级 2 占 33%的比例;下楼梯等级 4 占 33%的比例、等级 3 占 33%的比例、等级 2 占 33%的比例;移动楼梯等级 3 占 100%的比例;上楼梯等级 4 占 67%的比例、等

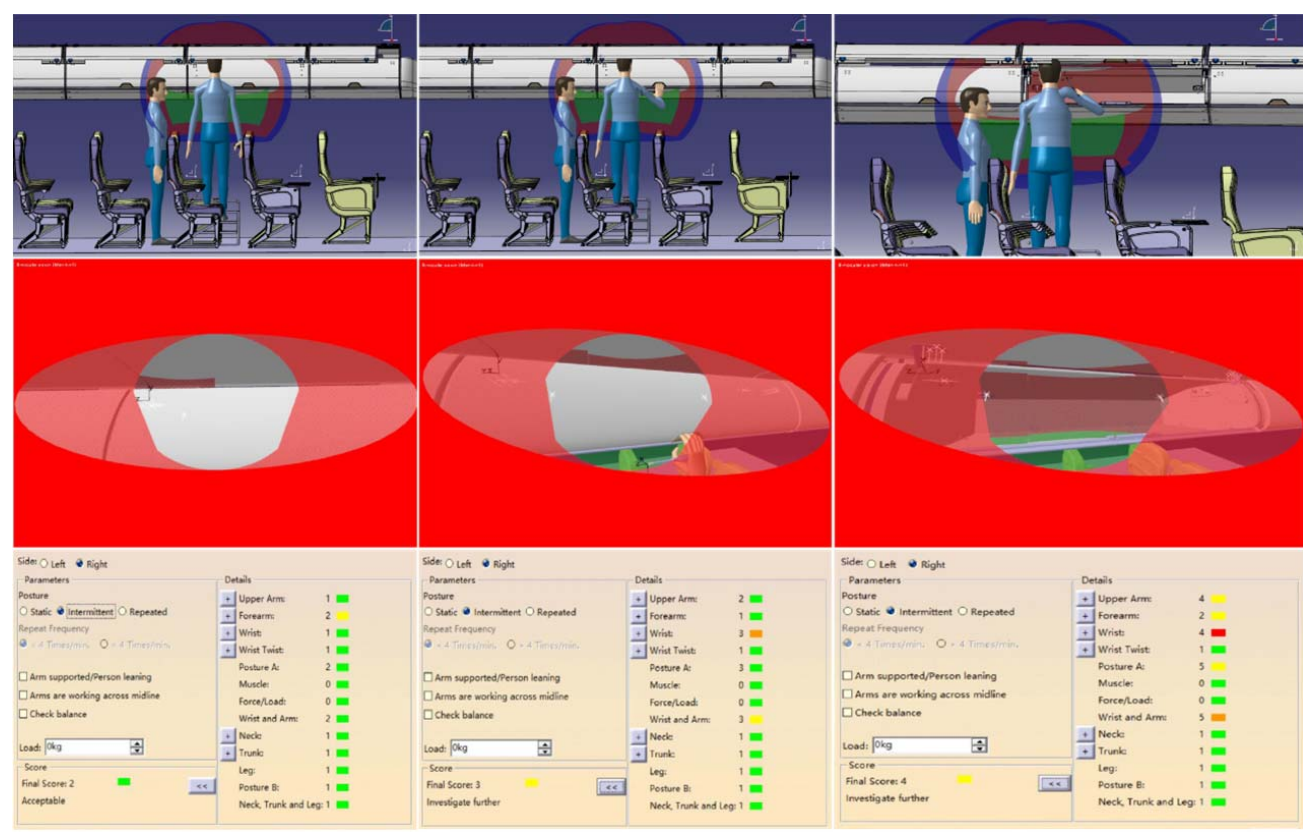


图 4 部分任务关键帧指标
Fig.4 Key frame indicators of some tasks

级 3 占 33%的比例;拆卸右侧螺钉等级 5 占 12.5%的比例、等级 4 占 12.5%的比例、等级 3 占 75%的比例;拆卸箱门等级 3 占 71%的比例、等级 4 占 14%的比例、等级 2 占 14%的比例。

3.3 某民机型号行李箱虚拟维修综合评估结果分析

本文基于 DELMIA 软件提出了民机内饰维修的仿真与评价优化方法,主要由维修作业分解、维修任务过程分段、维修动作归纳和面向维修过程的人机工效综合评估方法体系构成。

1) 能够获取维修任务过程的动态仿真问题预测及模拟仿真时间预估,使用 Human Task Simulation 模块对典型部件拆装过程进行仿真,在仿真过程中可判断零件的拆装有无干涉问题,若存在干涉问题可进行优化改进。仿真过程中得到典型部件在给定拆装顺序下的时间预估及典型部件单一拆卸模块的拆装时间,将典型部件整个流程仿真预估的拆装时间与整舱部件拆装平均时间指标进行对比,得出预估时间与平均时间指标的时间长短对比结果。若典型部件拆装预估时间大于平均时间指标,可以典型部件拆装的单一模块的拆装时间作为切入点,完成整个流程拆装时间的优化。

2) 在对动态仿真过程中的虚拟人可视、可达、姿态进行综合评估时,通过量化数据可以得到维修部件的可优化点,并基于可优化点实现进一步优化。

正如本文中客舱行李箱门的案例分析结果,从维修人员的角度出发,有助于人员维修舒适度的提升,从维修部件的角度出发,能够优化维修部件的使用配合度。

通过对客舱行李箱箱门维修分析进行了案例验证,根据选取的 38 个关键帧的综合评价结果可知,由于客舱维修通道受限,因此维修台即本文描述为维修楼梯的尺寸及样式会对维修人员的操作效率及舒适度有一定影响,此外拆卸箱门连接件的左右螺钉,经分析可知其不适等级较高。主要是在拆卸箱门过程中,操作者大部分的维修作业空间在头部及以上,并需要拆卸 4 颗螺钉,拆卸螺钉时间占整个拆卸箱门比重大,保持维修姿势的时间增长,拆卸左侧螺钉执行阶段 RULA 分析,可知操作人员在维修过程中的不舒适。但操作人员没有辅助拆卸或支撑维修人员上臂的工具,长期作业易对操作人员上肢产生损伤。同时,在维修人员配合问题上通过仿真也发现了部分可能增加人体不适度的情况。

3.4 某民机型号行李箱虚拟维修优化建议

针对案例结果分析设计建议如下。

1) 针对民机内饰中像行李箱这种需要借助维修台的辅助来进行维修操作的内饰部件,由于维修通道受限,可对其辅助维修台进行优化设计,设计切入点为便于移动、高度可灵活调整。

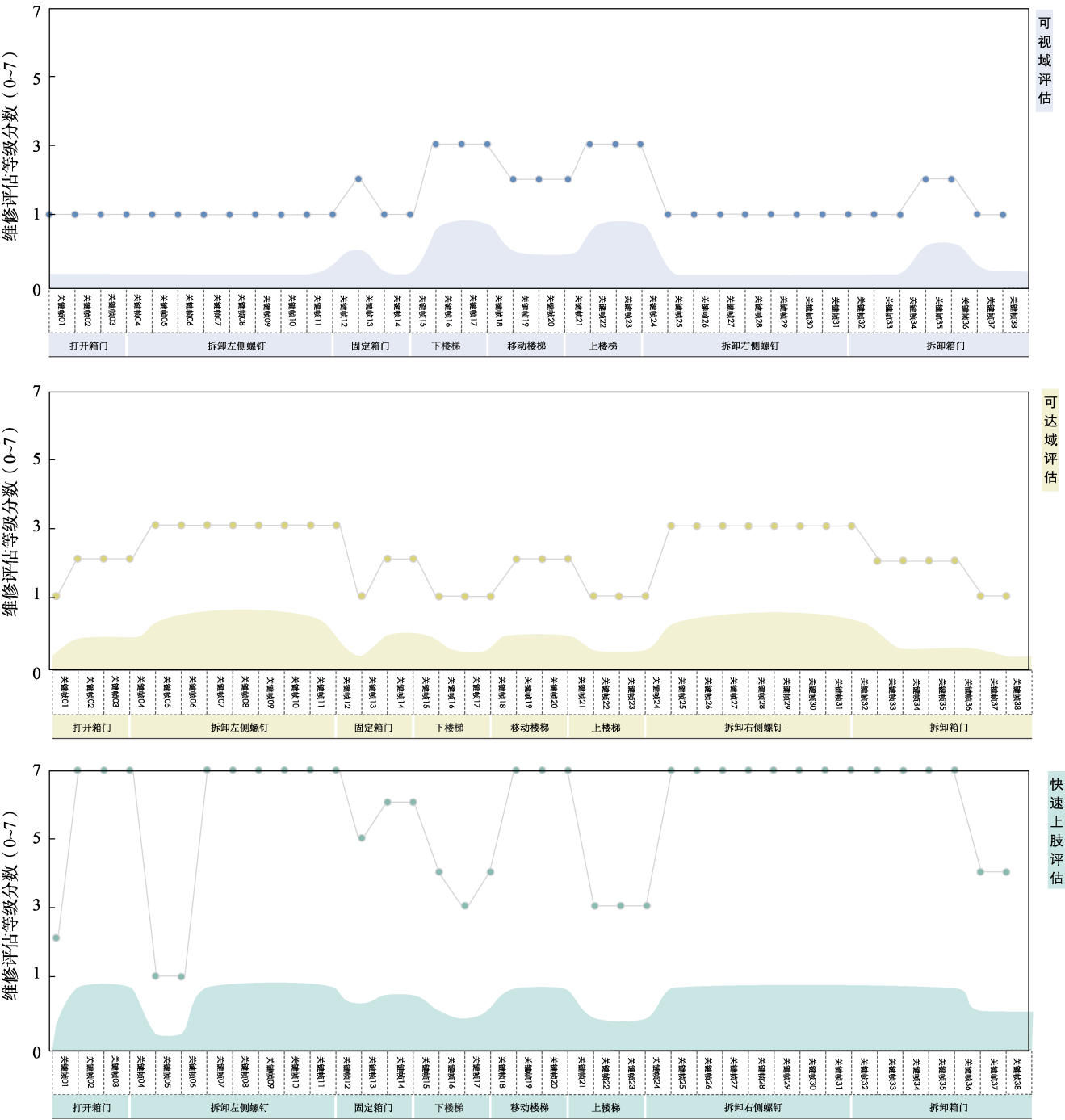


图 5 箱门拆卸可视、可达、姿态量化
Fig.5 Visualization, accessibility and attitude quantification chart of trunk door disassembly

2) 需要对箱门连接件进行优化, 选用尽量避免长时间的手过头操作, 即可以选用拨片式设计, 实现按压弹扣, 缩短维修人员操作时间。

3) 考虑设计辅助拆卸工具, 本文关键帧获取能够为辅具设计提供数据支撑, 通过设计辅助拆卸工具, 保证能够降低维修人员长时间手过头操作的不舒适度, 从而降低维修人员职业病的发生概率。

4) 针对操作者配合的流程优化问题, 辅助操作者需要帮助主要操作者完成维修任务, 当主要操作者

移动到右侧时, 需要固定箱门左侧的螺钉, 防止箱门或其他部件损坏, 此时辅助操作者的作业空间高于头顶, 由 RULA 分析可知, 其前臂在此姿势下不舒适。当主操作者移动到另外一侧后, 应视情况判断是否需要再抓取箱门左侧, 若主操作者不便拆卸, 应该保持姿势, 但易对辅助操作者上肢产生损伤, 若方便拆卸可以回到站立状态, 等待主要操作者完成右侧螺钉拆卸后再完成拆卸任务。因此, 在配合问题上通过仿真可提前获取较优配合方式, 减少不适损耗。

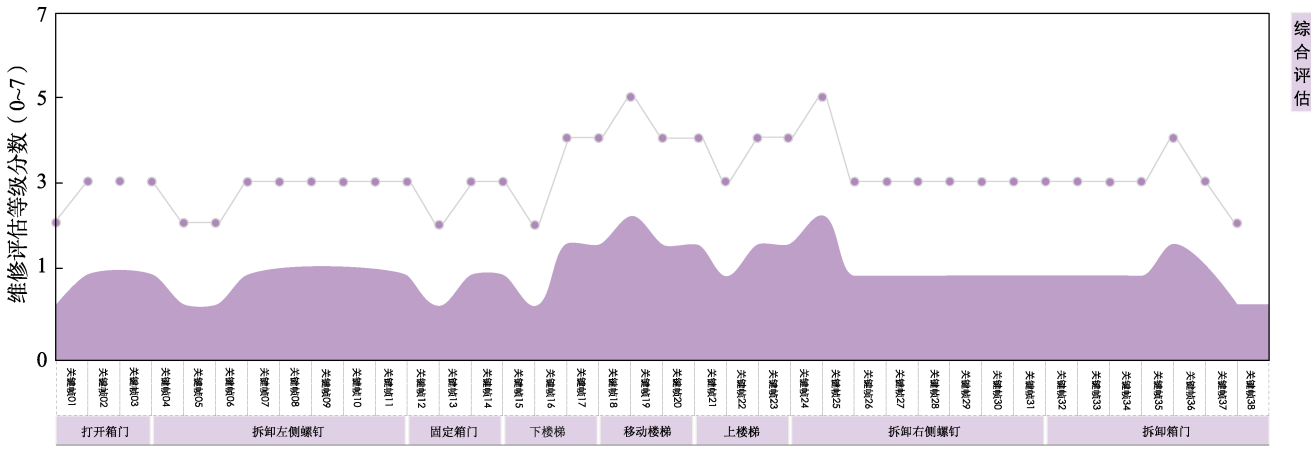


图 6 拆卸箱门的人机工效综合评价
Fig.6 Comprehensive evaluation diagram of ergonomics for dismantling the trunk door

4 结语

为了保证虚拟维修仿真的高效性及评估的可靠性, 本文提出了基于 DELMIA 软件的维修仿真与评价优化方法。首先依据虚拟维修仿真相关理论提出了基于 DELMIA 的虚拟维修仿真出发点, 依据维修任务分解的思想, 对维修操作者本身动作、工具设备的动作、零部件动作进行分解; 其次在综合考虑维修动作库的完整性与可靠性, 以及单个维修动作设计的独立性的基础上划分作业阶段, 并总结归纳各个阶段所需要的维修动作; 再次根据实际作业过程的基本维修作业特征完成自适应参数驱动方法和外设模拟仿真方法的确定, 并进行仿真, 依据综合评估优势进行关键帧综合评估结果的获取, 并基于 MATLAB 完成权重向量的生成和检验, 得到最终综合结果; 最后根据综合结果提出了本次维修的可优化方向。该方法对虚拟仿真在民机内饰维修的应用及维修辅具的设计具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 郝天峰, 贾晓亮. 面向 PLM 的飞机虚拟协同维修性分析及评价[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 80-85.
HAO Tian-feng, JIA Xiao-liang. Analysis and Evaluation of Aircraft Virtual Collaborative Maintainability Oriented to PLM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 80-85.

[2] 王宪成, 李勃, 李莉. 基于 Virtools 4.0 的某型船艇柴油机虚拟维修关键技术研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(2): 27-31.
WANG Xian-cheng, LI Bo, LI Li. Research on Key Technology of Virtual Maintenance Certain Boat Diesel Engine Based on Virtools 4.0[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(2): 27-31.

[3] GUO Zi-yue, ZHOU Dong, ZHOU Qi-di, et al. Appli-

cations of Virtual Reality in Maintenance during the Industrial Product Lifecycle: A Systematic Review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 525-538.

[4] 郭子玥, 周栋, 郝爱民, 等. 虚拟维修技术近 10 年研究进展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2022, 34(5): 659-674.
GUO Zi-yue, ZHOU Dong, HAO Ai-min, et al. Review on Advances in Virtual Maintenance in Recent Ten Years[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2022, 34(5): 659-674.

[5] 华钱锋, 屠立. 面向复杂装备维修的虚拟现实集成平台[J]. 装备制造技术, 2019(3): 165-167.
HUA Qian-feng, TU Li. Key Technology on Virtual Reality Maintain Platform Development Oriented to Complex Equipment[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(3): 165-167, 186.

[6] 徐张桓, 许琰, 张悦, 等. 基于 DELMIA 的航空发动机虚拟装配技术研究[J]. 制造技术与机床, 2022(2): 94-98.
XU Zhang-huan, XU Ying, ZHANG Yue, et al. Research on Virtual Assembly Technology of Aircraft Engine Based on DELMIA[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(2): 94-98.

[7] NUMFU M, RIEL A, NOEL F. Virtual Reality Based Digital Chain for Maintenance Training[J]. Procedia CIRP, 2019, 84: 1069-1074.

[8] KELLY R, SKILTON R, NAISH J. Real-Time Volumetric Rendering of Radiation Fields Using 3D Textures[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 146: 551-554.

[9] 徐丙立, 张飞, 张承钊, 等. 沉浸式虚拟维修位置追踪与动作虚实耦合研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2019, 51(1): 8-12.
XU Bing-li, ZHANG Fei, ZHANG Cheng-dian, et al. The Position Tracking and Action Matching for Immersive Virtual Maintenance[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 8-12.

- [10] DENG Gang-feng, HUANG Xian-xiang, GAO Qin-he, et al. A Real-Time Interaction Strategy for Virtual Maintenance Based on Motion Capture[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2014, 49(3/4): 332.
- [11] VUJOSEVIC R, IANNI J. A Taxonomy of Motion Models for Simulation and Analysis of Maintenance Tasks[J]. Center for Computer Aided Design. The University of Iowa. Department of the Air Force AL/HRGA Wright- Patterson AFB, OH, 1997.
- [12] BADLER N, BINDIGANAVALA R, ALLBECK J, et al. Parameterized Action Representation and Natural Language Instructions for Dynamic Behavior Modification of Embodied Agents[C]. AAAI Spring Symposium, 2000.
- [13] BERNARD F, ZARE M, SAGOT J C, et al. Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability[J]. Human Factors: the Journal of Human Factors and Ergonomics Society, 2020, 62(1): 37-54.
- [14] 毕文豪, 范秋岑, 李德林等. 基于多视角的民机正向设计建模方法[J]. 航空学报, 2023, 44(10): 155-176.
- BI Wen-hao, FAN Qiu-cen, LI De-lin, et al. Modeling Approach for Forward Design of Civil Aircraft Based on Multiple Perspectives[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(10): 227536.
- [15] LU Zhong, SUN You-chao. Research on Maintainability Evaluation Model Based on Fuzzy Theory[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(5): 402-407.
- [16] GENG Jie, ZHOU Dong, LV Chuan, et al. A Modeling Approach for Maintenance Safety Evaluation in a Virtual Maintenance Environment[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(5): 937-949.
- [17] 丁勇, 杨子佳, 周唯杰. 民机虚拟产品维修性评价方法研究[J]. 飞机设计, 2012, 32(1): 72-77.
- DING Yong, YANG Zi-jia, ZHOU Wei-jie. Research on Maintainability Evaluation Method for Civil Aircraft Virtual Products[J]. Aircraft Design, 2012, 32(1): 72-77.
- [18] 丁勇. 产品拆卸序列规划与维修性评价方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- DING Yong. Research on Product Disassembly Sequence Planning and Maintainability Evaluation Method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [19] 邱世广. 维修动作混合仿真及人机工效自动评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- QIU Shi-guang. Research on Hybrid Simulation of Maintenance Action and Automatic Evaluation Method of Ergonomics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

责任编辑: 陈作

(上接第 51 页)

- [20] 田琦, 吕淑然. 基于照明及眼动实验的冰箱操作界面优化设计[J]. 包装工程, 2021, 42(24): 230-236.
- TIAN Qi, LYU Shu-ran. Optimal Design of Refrigerator Operation Interface Based on Lighting and Eye Movement Experiments[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 230-236.
- [21] XIAO L, WANG S. Mobile Marketing Interface Layout Attributes That Affect User Aesthetic Preference: An Eye-Tracking Study[J]. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, 2022.
- [22] CHENG S, WEI Q. Design Preferred Aesthetic User Interface with Eye Movement and Electroencephalography Data[C]// Proceedings of the 2018 ACM Companion International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. 2018: 39-45.
- [23] CELIKORS E, SIMS C R. The Relationship Between Aesthetic Choices, Ratings, And Eye-Movements[C]// International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Cham: Springer, 2018: 75-82.

责任编辑: 陈作