基于虚拟仿真的直升机工程维修性设计

王汇元
哈尔滨飞机工业集团有限责任公司　黑龙江 哈尔滨　150000

摘　要　本文构建了一套基于虚拟维修仿真的直升机工程维修性分析系统，提出由虚拟维修样机建模、维修过程仿真、维修性定量评价、系统管理功能模块组成的集成化架构，利用Jack人因工程仿真平台，实现高保真度的人机交互拆装操作模拟，支持可达性、可视性、操作空间、作业时间等关键维修性指标的量化提取。以某典型机载部件拆卸任务为验证对象，系统成功复现实际维修流程，动作合理性和工效评估结果符合工程预期，验证了该方法在提升直升机维修性设计前置的有效性。

关键词　虚拟仿真；直升机工程；维修性；设计

Helicopter Engineering Maintainability Design Based on Virtual Simulation

Wang Hui-yuan
Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150000, Heilongjiang Province, China

Abstract　This paper establishes an integrated helicopter engineering maintainability analysis system based on virtual maintenance simulation. It proposes a framework consisting of virtual maintenance prototype modeling, maintenance process simulation, quantitative maintainability evaluation, and system management modules. Utilizing the Jack human factors engineering simulation platform, the system achieves high-fidelity simulation of human-machine interactive disassembly and assembly operations. It supports the quantitative extraction of key maintainability metrics such as accessibility, visibility, operational space, and task duration. Taking the disassembly task of a typical airborne component as a case study, the system successfully replicates the actual maintenance process, with the rationality of actions and ergonomic evaluation results aligning with engineering expectations, thereby validating the effectiveness of this method in enhancing the front-end design of helicopter maintainability.

Key words　Virtual Simulation; Helicopter Engineering; Maintainability; Design

随着计算机图形学、CAD建模与虚拟现实技术深度融合，数字样机已逐步替代物理样机，成为产品全生命周期研制的重要载体，为维修性工程的前置介入创造了条件。传统维修性分析方法依赖手工评估，存在周期长、成本高、定量不足等问题，难以适应数字化协同设计需求。为此，亟须构建面向数字样机的虚拟维修仿真平台，实现对维修过程的高保真虚拟复现。该平台应能在三维虚拟环境中开展可达性、可视性、操作干涉及人机工效等动态分析，并基于任务分解模型（TDM）预测维修作业时间，生成定量化的维修性评价报告与结构优化建议。此类工具可嵌入直升机等复杂装备的早期设计阶段，支持“设计—维修”一体化迭代，也可用于后期维修规程验证与培训演示，显著提升维修性设计的科学性与效率。

1　系统整体架构

基于虚拟仿真的直升机工程维修性分析系统采用四层架构设计，逻辑清晰、功能耦合紧密。其中，界面层集成多模态交互设备，如数据手套、头盔显示器、语音输入等数据，实现用户指令输入和三维可视化反馈；应用层涵盖虚拟样机建模、维修过程仿真、多维度分析工具，支持可达性、可视性、人因工效、工作空间干涉检测等维修性指标的量化评估，并生成综合评价报告；对象层统一管理虚拟样机、维修人员、环境、过程模型的数据结构，保证几何、装配、行为信息的完整性；技术支持层利用Jack等虚拟人体仿真平台、PDM系统、网络基础设施，提供高保真运动仿真能力。该架构有效支持拆卸任务在数字空间中的全流程复现，为直升机维修性设计提供可追溯的技术路径。

2　系统的主要功能

2.1 虚拟样机建模功能

虚拟样机建模功能通过STEP、IGES等中性格式，实现多源CAD几何数据的高效转换，并依据维修仿真需求对模型进行拓扑简化和轻量化处理，在保留关键结构特征的同时，科学降

低计算负载。另外，系统自动提取原始装配约束关系，重新构建符合维修逻辑的层级化装配树，支持部件按维修顺序动态分析，且该模块赋予虚拟样机将运动学、交互行为作为语义的能力，包括铰接件的旋转自由度、快卸锁的开合动作、人机接触响应规则，并通过行为规划引擎预定义拆装路径、操作时序、约束条件，由此形成完整的虚拟样机，其具备精确几何表达能力，为后续可达性分析、干涉检测、人因仿真提供结构化数据基础，大幅度提高维修性设计在产品早期阶段的可验证性。

2.2 维修过程仿真功能

本系统采用非沉浸式仿真模式，通过构建高保真维修场景，集成虚拟样机、工具模型、人体数字孪生体，形成完整作业环境。在仿真流程中，以任务树作为驱动逻辑，将复杂维修活动分解为若干原子操作单元，依次执行部件拆卸、工具介入、肢体动作等仿真步骤，并自动生成结构化仿真脚本，且系统支持脚本回放、动画输出等功能，实现维修过程的可视化追溯。在仿真运行中，同步开展碰撞检测、运动干涉分析、操作可达性验证，实时采集关节角度、操作时间、视线遮挡等参数。待所有仿真数据经标准化封装后，为后续维修性分析和评价模块提供定量输入，支撑可达性、可视性、人因工效等指标的客观评估，从而实现从“过程模拟”到“性能判据”的闭环转化，大幅提高维修方案在设计阶段的可验证性。

2.3 维修性分析与评价功能

维修性分析与评价功能是将仿真检测输出的障碍数据作为基础，开展多层级、定量化评估，先精准识别干涉区域、操作盲区、人机冲突点，并依据影响程度、发生频率、可规避性，构建障碍等级评价模型，划分高、中、低风险等级；继而结合任务分解结构（TDS），从维修动作、维修作业、维修任务方面逐级评估维修效能。基于障碍分布、人体工效参数，采用时间预测算法估算标准拆卸工时，并综合可达性、可视性、操作舒适度等指标，自动生成维修性综合评分。最终，系统自动生成结构化分析评价报告，内嵌可视化障碍图谱、优化建议及改进前后对比数据，为直升机工程设计提供可追溯的决策支持，推动维修性由经验判断向数据驱动发展。

2.4 系统管理与数据维护功能

在运行管理层面，系统支持非沉浸式、沉浸式仿真模式的灵活切换，并对仿真精度（几何简化阈值、碰撞检测容差）、分析评价策略（障碍权重分配、时间估算模型）进行参数化配置，保证评估结果和工程需求相匹配。数据管理模块则贯穿仿真全生命周期，统一组织存储虚拟样机、任务脚本、人体动作捕捉数据、干涉检测日志、最终评价报告等信息，实现版本追溯。尤为关键的是，基础数据维护功能标准化管控支撑仿真的核心资源库，包括维修工具族库、保障设施模型、数字人体模板（含性别、体型、关节活动范围）、行业时间标准，保证仿真输入的一致性。

3 系统实现与关键技术分析

3.1 维修任务导向的虚拟样机构建

在几何数据处理阶段，系统利用Jack平台集成的数据转换接口，支持VRML、STL、IGES、JT等多种异构格式批量导入，并统一输出为PSS专用格式，保证模型兼容性；随后，调用VTK库中的Decimator多边形简化算法，在保留安装孔位、配合面等关键几何特征的前提下，拓扑优化网格模型，显著降低渲染负载而不影响维修操作的空间判断精度，该流程满足了模型轻量化、工程保真度的要求，为后续高帧率人机交互仿真奠定基础。同时，在虚拟样机装配环节，系统自动解析原始CAD装配树中的父子层级和约束关系，重新构建符合维修逻辑的装配结构，支持零部件合并、坐标系重定向、空间方位微调，保证拆装顺序和实际维护规程的一致性。在此基础上，样机行为定义模块赋予部件动态语义，通过运动学求解器计算拆卸路径中始末位姿间的相对位移和旋转量，动态更新对象间的连接状态，并基于人手抓握生物力学模型，预设典型徒手操作的抓握点、自适应手形匹配策略。

3.2 非沉浸式维修过程仿真实现

非沉浸式维修仿真系统采用任务驱动与动作自由两种模式，支持不同粒度的维修过程数字化复现。

系统导入直升机任务样机，构建符合人体尺寸的数字人模型，并集成工具、支撑平台等周边设施，形成高保真仿真场景。动作仿真支持参数化配置移动、抓取、拆卸等基础维修动素，适用于局部人机交互优化；任务仿真则严格遵循预设任务树结构，确保符合实际维修规程，并可生成结构化仿真脚本，支持回放与动画输出。

仿真过程中嵌入实时可达性检测机制，基于人体关节活动范围与空间几何关系，动态计算手部距离、干涉情况与操作舒适度。结果以距离数值、碰撞高亮、舒适度评级等形式可视化呈现，为维修性评价提供客观量化依据，有效提升维修方案在设计阶段的可实施性。

3.3 维修性定量分析与综合评价流程

维修性分析与评价模块以维修任务为数据聚合单元，通过“.tsk”任务定义文件关联样机场景、装配树、拆卸步骤等输入

要素，确保模块间语义统一协同运行。虚拟样机建立模块据此加载PSS几何模型，并将行为特征写入“.mk”特征数据库，形成具备维修语义的数字孪生体。

维修仿真模块解析拆卸步骤生成任务视图，驱动人机操作序列执行，同时将干涉信息、工具序列等结构化存储于“data.tcl”障碍数据文件中。该任务中心化数据架构保证了多源数据的一致性，并支撑高效模块通信[1]。

分析阶段导入任务文件与障碍数据，系统可生成障碍分析报告、工效学评分（分动作、单元、任务三级）及基于10类动素时间标准的作业时长估算，所有结果按任务结构组织，最终形成图文并茂的维修性分析报告。

系统基础数据体系涵盖7大类203种工具模型、多体型人体模板、标准姿势库及符合MIL-STD规范的维修时间基准，通过数据库统一管理，有效支持直升机维修性设计的标准化与可操作性。定量分析流程图如图1所示。

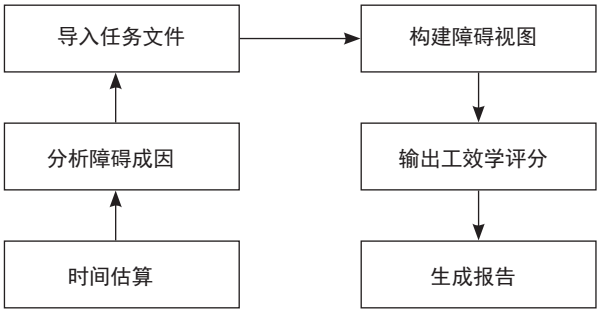


图1 定量分析流程图

4 案例分析

本案例以某高炮身管拆卸任务为例，验证基于虚拟维修仿真的维修性分析系统，该任务界定为基层级维修范围，具体步骤包括松开固定栓、操作压弹机盖等动作。原始几何模型由SolidWorks生成，并经过3DMAX处理转换为vrml格式，再通过系统数据转换功能导入并转化为.pss文件格式，实现了对样机几何模型的简化和重新装配，从而定义了样机行为特征及其操作特性[2]。

针对非沉浸式维修仿真，将身管拆卸任务细化至动素层，如“打开压弹机盖”被分解为抓取、打开、释放3个基本动素，有效支持了动作仿真工具对拆卸过程的顺序模拟，为进一步的可达性检测提供了基础。在仿真过程中，选择特定拆卸位置进行可达性检测，结果显示，在当前设定下完成某些动作存在距离上的不可达性，差值达到18.781 7 cm。这揭示了设计阶段可能忽略的人机交互问题，如空间限制、工具使用不便，充分凸显了维修性分析的重要性（如表1所示）。

表1 身管拆卸任务分解到动素层

拆卸步骤序号	拆卸步骤描述	维修动素序列（按操作时序）
1	打开压弹机盖	抓取→打开→释放
2	松开身管固定栓	抓取→拉→旋转→释放
3	抽出身管并放于指定位置	走→抓取→抽出→携物走→放物→释放
4	将身管固定栓复位	走→抓取→提起→旋转→释放→卸下
5	关上压弹机盖	抓取→关上→释放

仿真结束后，系统自动进行维修性分析与评价，估算整个过程的时间，从各个拆卸步骤到整体流程，系统评估其工效学合理性，考量因素涵盖操作难度、时间消耗、潜在障碍。最终生成的分析报告详述了每个步骤的操作效率、存在的问题及其改进建议，有效提高了维修任务规划的科学性，为产品设计优化提供了实证支持[3]。

5 结束语

本文构建了基于虚拟维修性分析系统，涵盖样机建模、非沉浸式任务仿真、多维度维修性评价、全周期数据管理等功能。通过高炮身管拆卸案例验证，系统可高效实现动作分解、可达性检测、障碍识别与工时估算，输出结果符合工程实际，操作流程清晰、分析过程可视化[4-5]。该平台将人因工效学和数字样机进行深度融合，全面提高维修性设计的前瞻性，为直升机等复杂装备的研制提供可靠的技术支撑，具备良好的工程推广价值。

参考文献

[1]贺贞辉,郑鑫,王一鸣,等.基于系统工程方法的装甲车辆维修性设计[J].设备管理与维修,2025(18):10-13.

[2]杜壹伦.黄浦江浦东新区堤防维修工程设计研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):149-153.

[3]邓博,甄伟,薛慧聪,等.某型装备载车系统维修性人机工程设计研究[J].包装工程,2023,44(12):111-117.

[4]王汇元.基于虚拟仿真的直升机工程维修性设计[J].航空科学技术,2024,35(7):82-89.

[5]张明,刘伟,陈昊.数字孪生驱动的复杂装备维修过程仿真与工效评价[J].计算机集成制造系统,2023,29(11):3565-3576.

（本文编辑 曹 阳）

