

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.240601002

# 基于虚拟现实技术的航天地面测控系统维修性设计与评价\*

吴慧伦<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>, 谭祥<sup>1</sup>, 柴霖<sup>1</sup>, 孙飞<sup>1</sup>, 陈梓鸿<sup>2</sup>

(1. 西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州 511370)

**摘要:**针对航天地面测控系统难以在研制早期有效实施维修性设计与评价的问题, 基于虚拟现实技术构建了维修性设计与评价系统, 制定了维修性设计与评价工作流程, 给出了维修性设计综合评价标准。在虚拟维修场景中, 采用虚拟维修样机和虚拟维修资源, 验证了整体流程, 并沉浸式仿真验证了某车载测控系统组件维修的可达性、可视性和人体舒适度, 实现了虚拟维修性设计的定量综合评价, 结果表明本方法较传统方法费用降低 68%, 工期缩短 61%, 可为航天地面测控系统在研制早期开展可视化、量化的维修性设计和评价提供参考。

**关键词:**航天地面测控系统; 维修性设计; 虚拟现实; 综合评价

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: V556.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2025)11-1729-08

## Maintainability Design and Evaluation of Space TT&C Ground System Based on Virtual Reality Technology

WU Huilun<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, TAN Xiang<sup>1</sup>, CHAI Lin<sup>1</sup>, SUN Fei<sup>1</sup>, CHEN Zihong<sup>2</sup>

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. China Electronics Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 511370, China)

**Abstract:** It's difficult to implement maintainability design and evaluation effectively in the early stages of development of space TT&C ground system. To solve this problem, a maintainability design and evaluation system is constructed based on virtual reality technology, a maintainability design and evaluation workflow is developed, and a comprehensive evaluation criteria for maintainability design is proposed. In the virtual maintenance scenario, virtual maintenance prototypes and virtual maintenance resources are used to verify the overall process, and immersive simulation is conducted to verify the accessibility, visibility, and human body comfort of the maintenance of components of a vehicle mounted space TT&C ground system. Thus the quantitative comprehensive evaluation of virtual maintainability design is achieved. The results show that this method reduces costs by 68%, shortens duration by 61% compared with traditional method. It may serve as a practical reference for visualizing, quantifying carrying out maintainability design and evaluation in the early stages of development of space TT&C ground system.

**Key words:** space TT&C ground system; maintainability design; virtual reality; comprehensive evaluation

### 0 引言

航天地面测控系统是航天器天地联系通道的重要组成部分, 用于对航天器的飞行过程进行跟踪、测量与

控制, 保证航天器按预定的状态和计划完成航天任务<sup>[1]</sup>。为适应我国航天任务高密度执行, 确保大规模星座长期运行可靠, 航天地面测控系统不仅在功

\* 收稿日期: 2024-06-01; 修回日期: 2024-10-06  
通信作者: 柴霖 Email: chailin@cetc.com.cn

能和性能上持续创新,而且采用链路冗余、功能重构、设备冗余、通道冗余、模块冗余、元器件冗余等多种强化设计措施,其复杂度和集成度节节攀升,维修保障难度急剧增大。传统研制过程中,由于设计考虑不周、人工核查手段局限以及试验评价依赖实物样机,维修性设计缺陷直到研制完成或交付后才暴露,导致维修保障时效性差,严重影响航天地面测控系统的战备完好性和实战效能发挥。

虚拟维修技术是利用数字人体建模、立体可视化、图形图像和动作捕捉等计算机相关技术,对维修过程进行动态或静态仿真,进而解决产品维修性或维修相关问题的综合性技术<sup>[2]</sup>。虚拟维修技术自20世纪50年代发展至今,从技术准备、系统探索、走到工程实践,已在国际航天领域获得很多成功应用,例如:美国航空航天局可以在地面对航天员进行在轨舱外维修哈勃望远镜任务的模拟训练<sup>[3-4]</sup>;洛克希德马丁空间系统公司和美国航空航天局合作,对猎户座宇宙飞船进行了人机工程方面的模拟分析<sup>[5]</sup>;欧洲航天局利用虚拟协同定位技术开展国际空间站维护操作的实际地面训练<sup>[6]</sup>;德国航空航天中心利用交互式仿真技术开展卫星在轨服务仿真训练<sup>[7]</sup>。国内航天领域在虚拟维修训练、虚拟维修性验证等相关方面也取得了一定成果,例如:中国航天员科研训练中心研制虚拟操作训练演示系统,实现了“神舟七号”2名航天员协同回收载荷操作训练<sup>[4]</sup>;中国空间技术研究院采用虚拟维修仿真验证方法对我国“天宫一号”空间实验室在轨的维修操作进行了验证<sup>[7]</sup>,开展了“天宫一号”在轨飞行期间内装饰板的更换操作分析<sup>[8]</sup>;北京空间飞行器总体设计部搭建虚拟维修仿真平台验证了空间机械臂维修操作的可视性、可达性、可操作性和安全性<sup>[9-10]</sup>。但是,虚拟维修技术在航天地面测控系统研制过程中的应用研究暂无公开文献。

本文利用虚拟现实技术的全境数字化优势,构建模型数字化、信息集成化、人机交互自然化的虚拟维修性设计与评价系统,结合常规维修性设计和虚拟维修性设计特点,制定维修设计与评价流程对研制过程的维修性设计活动进行系统组织,建立虚拟样机、虚拟维修资源和维修场景对航天地面测控系统的维修全过程开展沉浸式仿真验证,以增强维修性设计要求在航天地面测控系统研制早期的约束能力,提高研制质量、降低维修保障压力。

## 1 虚拟维修性设计与评价系统

### 1.1 系统概述

虚拟维修性设计与评价系统由3套工程师桌面环境和1套虚拟现实实验室环境组成,通过配置专业硬件和软件,具备维修性项目管理、维修性设计分析、虚拟维修仿真验证、维修性综合评估、人机工效仿真分析、交互式维修仿真内容制作等功能。该系统的硬件均部署在6.2 m×5.6 m×3.2 m大小的房间内。房间的一面墙上安装有2.42 m×2.025 m的3D LED显示屏幕(分辨率为1 536 pixel×1 296 pixel),房间顶部安装4个动作捕捉镜头,动作捕捉空间为3 m×3 m,在专业软件的辅助下,营造出多用户戴上立体眼镜在空间中观看图形的共享虚拟环境。虚拟维修性设计与评价系统的布局如图1所示。



图1 虚拟维修性设计与评价系统布局

### 1.2 硬件组成

虚拟维修性设计与评价系统的硬件由虚拟场景生成设备、感知设备、跟踪设备和基于自然方式的人机交互设备等组成。在工程师桌面环境中,硬件由虚拟现实头盔、全身动作捕捉系统、数据手套、计算机及显示器等组成,主要用于工程师开展日常维修性设计工作。在虚拟现实实验室环境中,硬件由3D LED显示系统(含显示屏、拼接处理器、大屏智能控制系统、扬声器、功率放大器等)、光学位置跟踪系统(含动作捕捉镜头、交换机等)、图形工作站、网络交换机、中控系统及相关配套设备等组成,主要用于多人沉浸式虚拟维修仿真验证、协同协调、综合评审、汇报展示等工作。通过网络,虚拟维修性设计与评价系统与现有的数字化产品研发环境(包括全过程多专业设计协同系统、产品数据管理系统、数字化结构设计系统、可靠性工程设计验证系统等)交互,实现维修性设计所需的产品数据、数字样机、可靠性数据等的共享和集成应用。虚拟维修性设计与评价系统的硬件组成如图2所示。

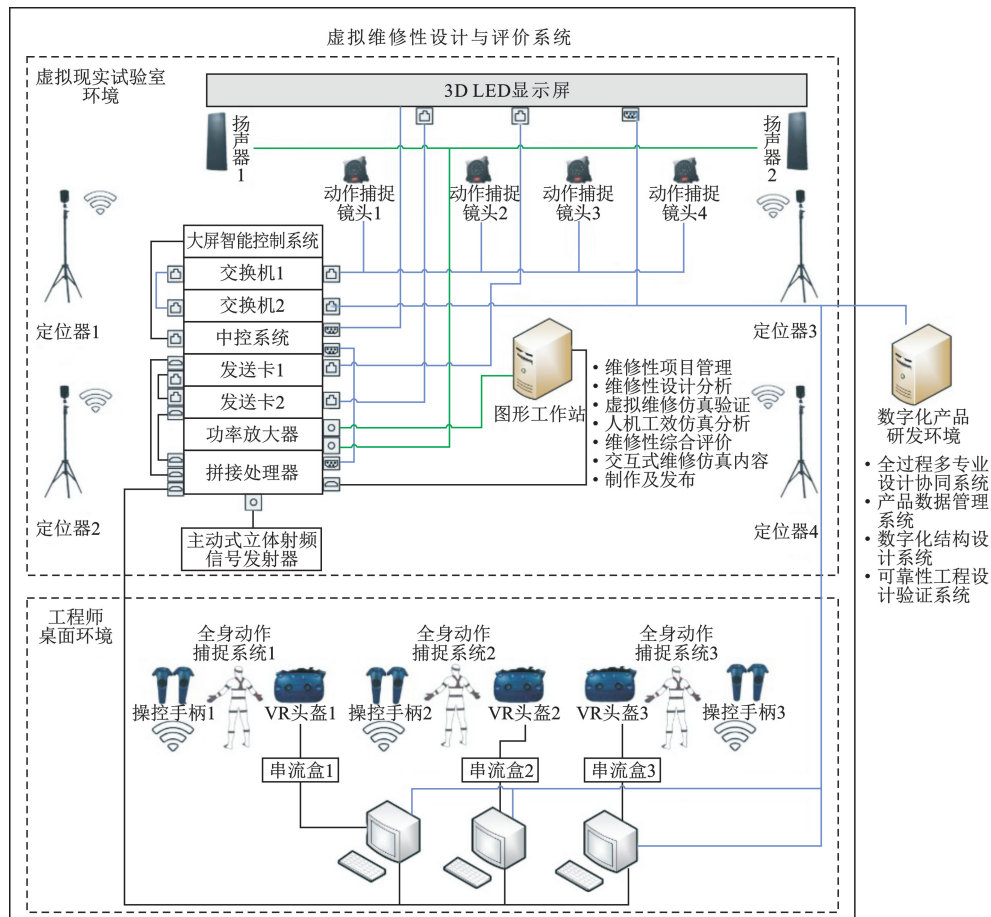


图 2 硬件组成框图

1.3 软件组成

采用 REDVS-MSES 虚拟维修性设计评价与验证软件作为开展虚拟维修性设计与评价的工作平台,实现维修性管理、设计、分析、验证及评估等功能。该工作平台与虚拟现实外设接口的相关软件

(如 StreamVR 软件、Axis Studio 软件、UG 软件、3ds MAX 软件等)共同实现数字样机制作、虚拟环境构建、虚拟维修过程模拟等应用。虚拟维修性设计与评价系统各软件的功能详见表 1。

表 1 软件组成

序号	软件名称	软件功能	
1	REDVS-MSES 维修性设计评价与验证软件	维修性项目管理 支持创建维修性项目,配置当前项目的文件表(包括维修性设计准则库、评估准则库、维修备件库、工具库等) 维修性设计分析 支持维修性指标分配、预计、设计准则制定和符合性检查,以图形化的方式构建具体产品的维修性分析模型,生成人机环工程仿真分析数据 虚拟维修仿真验证 支持开展基于产品数字样机的静态核查、沉浸式虚拟维修仿真和非沉浸式虚拟维修仿真等 人机工效仿真分析 支持可达性、可视性、舒适度、作业任务等实时分析 维修性综合评估 支持桌面式的维修性分析验证、沉浸式的虚拟应用环境维修性分析验证,给出分析评价结果 交互式维修仿真内容制作及发布 支持以交互的方式生成经过维修验证的优化设计方案,发布可脱离编辑环境的交互式电子技术手册	
	2	StreamVR 软件	为虚拟现实头盔使用人员提供功能完整的 360° 房间空间虚拟现实体验
	3	Axis Studio 软件	驱动数字人体进行动作捕捉,为用户提供精准易用的三维动作数据
	4	UG 软件	CAD/CAE/CAM 一体化的机械工程计算机软件,实现三维产品形体制造
	5	3ds MAX 软件	3D 建模渲染和制作软件,实现输入数字样机检验

## 2 虚拟维修性设计与评价工作流程

为实现航天地面测控系统的产品设计与维修性设计全过程衔接,制定维修性设计与评价工作流程,规划了从产品设计工作开始,利用虚拟维修性设计

与评价系统开展常规维修性设计与评价,以及利用虚拟现实技术深入开展维修性设计综合评价的工作顺序、工作输入和工作输出要求。虚拟维修性设计与评价工作流程如图 3 所示。

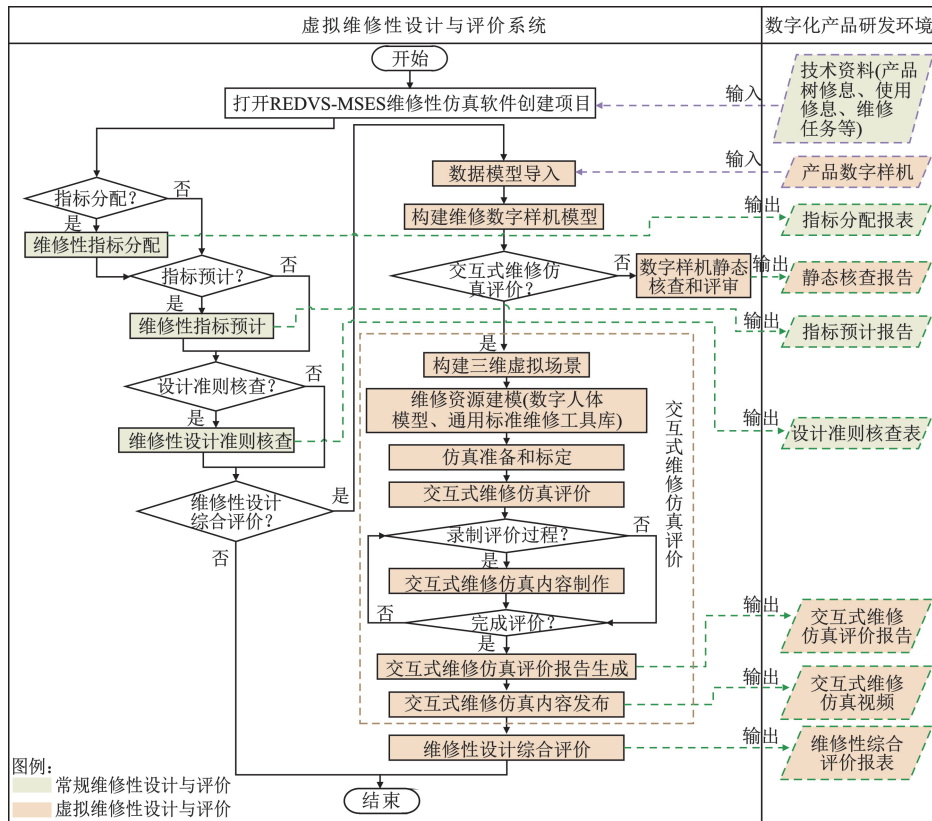


图 3 虚拟维修性设计与评价工作流程

该工作流程中,常规维修性设计与评价工作主要包括维修性指标分配、指标预计及设计准则核查等;虚拟维修性设计与评价工作主要包括数字样机建模、数字样机静态核查和评审、交互式维修仿真评价、维修性设计综合评价等。通过网络,数字化产品研发环境可为维修性设计与评价工作提供所需的产品基本信息、使用信息、数字样机等输入技术资料,维修性设计与评价工作的输出成果(如指标分配和

预计报表、设计核查报告、交互式维修仿真评价报告、维修性综合评价报表等)也可反馈给数字化产品研发环境,辅助进行产品设计决策。

为实现维修性设计的定量评价,综合考虑可达性、可视性、舒适度等方面的因素,制定虚拟维修性设计综合评价标准,并根据综合分值范围制定了 4 个评价等级。虚拟维修性设计综合评价标准详见表 2。

表 2 虚拟维修性设计综合评价标准

序号	评价标准				评价等级
	可达性	可视性	舒适度	综合分值范围	
1	维修部件位于可操作空间内,采用通用工具维修,工具可转动角度大于 60°	光照条件良好,操作空间与维修部位在最佳视野区域内	操作没有困难	(85,100]	优
2	维修部件位于可操作空间内,采用通用工具维修,工具可转动角度为 30°~60°	光照条件良好,经操作人员调整姿态后,操作空间与维修部位在最佳视野区域内;光照条件一般,操作空间与维修部位在最佳视野区域内	操作困难较小	(70,85]	良

表2(续)

3	维修部件位于可操作空间内,采用通用工具维修,工具可转动角度小于 30°	光照条件一般,经维修人员调整姿态后,操作空间与维修部位在最佳视野区域内;光照条件差,经维修人员调整姿态后,操作空间与维修部位在最佳视野区域内	操作困难较大	(50,70]	中
4	维修部件与人员之间存在障碍物,经维修人员调整姿态后可获得操作空间;维修部件时需要先拆卸其它部件;维修部件不具备操作空间;维修部件必须采用专用工具	光照条件差,部分操作空间 and 维修部位在最佳视野内;光照条件差,经维修人员调整姿态后,操作空间和维修部位仍不在最佳视野内	操作困难很大或无法操作	[0,50]	差

### 3 应用实例

航天地面测控系统的装载形式包括固定站、车载站和船载站,通常由数个分系统和数百台套单机设备组成,高新技术密集,内部结构精密,模块集成度高<sup>[11]</sup>。随着可用性要求提高,系统的维修性定量指标已由过去的基层级平均修复时间不大于 30 min 缩短到不大于 20 min。例如,某车载系统密集部署有相控阵天线子阵,每个相控阵天线子阵都有 1 个瓦式一体化 T/R 组件(以下简称组件)作为基层级现场可更换单元,在局促的安装空间内实现组件良好的维修性设计尤为困难<sup>[12]</sup>。本次虚拟维修设计与评价选取该系统中某设计薄弱的组件为对象开展,具有代表性。

### 3.1 虚拟维修性设计

#### 3.1.1 虚拟维修任务定义

给定维修任务为:在野外使用时,系统监控软件检测并隔离到天线某组件发生故障。按照维修操作手册,派出 1 名维修人员到达现场,按规定的程序和方法进行组件维修。

#### 3.1.2 虚拟维修过程建模

组件维修全过程涉及范围较广,包括车辆操作、天线设备操作、组件拆装作业等。组件维修采用串行作业方式,主要包括准备、故障检测隔离、分解更换、检验、清理现场等维修活动。组件的维修流程如图 4 所示。

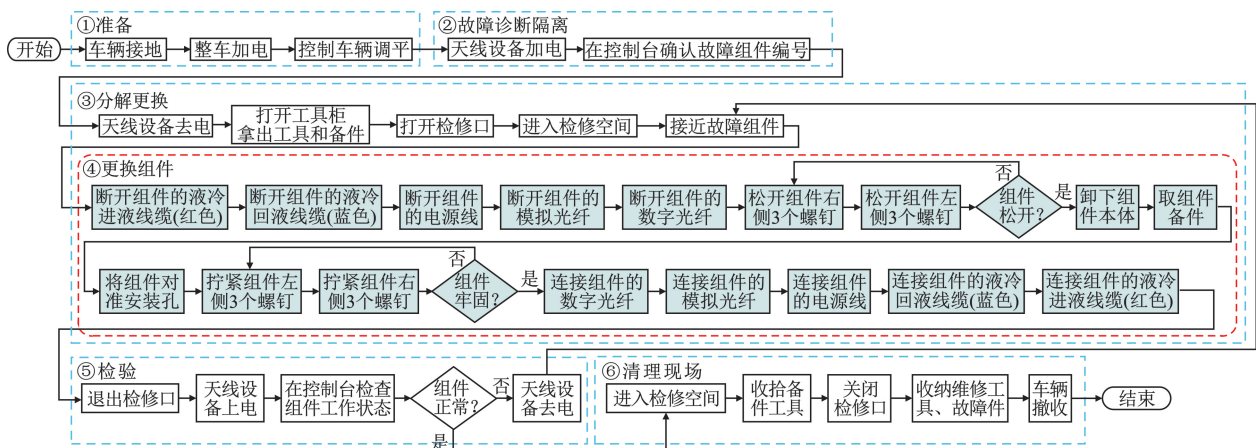


图 4 维修流程

为高效、经济地实现组件维修全过程动态展示,采用心灵转移、身体移动、轨道观察等多种交互方

式,利用图文看板引导虚拟维修活动,采用三维动画精细模拟更换组件的拆装作业。维修活动引导模型

如图 5 所示。

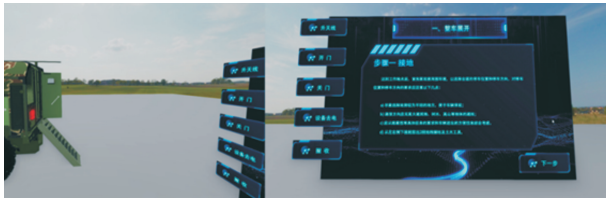


图 5 维修活动引导模型

### 3.1.3 虚拟维修样机建模

组件位于相控阵天线子阵后端,可实现通道收发信号隔离、功率放大、极化选择、数字采集与信号预处理、时频信号分发、光电转换等功能<sup>[13]</sup>。组件主体外形尺寸为 245 mm (长) × 237 mm (宽) × 58 mm (高),采用多层堆叠式设计,各层之间均采用可盲插的电连接器来实现多路信号的垂直互联,各层之间设计有相互配合的定位凸台和定位孔,以保证多层堆叠时对插的准确性和可靠性。为辅助安装和拆卸,组件上还设计有 2 个把手。

将全系统的 UG 数字样机通过数字化产品研制环境导入 REDVS-MSES 虚拟维修性设计评价与验证软件中,经自动轻量化处理后生成虚拟维修样机。虚拟维修样机采用网格三角面模型,不仅保留了原数字样机的几何特征和视觉特征,而且数据量仅为原数字样机的 20%,明显提升了运行速度。组件数字样机模型和虚拟维修模型如图 6 所示。

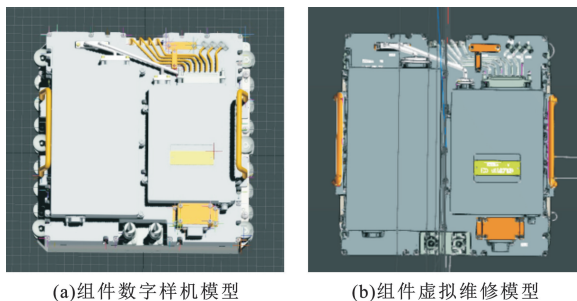


图 6 组件数字样机模型和虚拟维修模型

### 3.1.4 虚拟维修资源建模

组件维修资源由人员、工具、备件等组成。采用中国成年人人体数据<sup>[14]</sup>构建维修数字人体。根据实际情况,本次建模选择百分位数为 50 的中国男性数字人体。按照实际使用的史丹利专业工具套装 (89-885-23C),构造全套数字通用维修工具 (包括

20 类 61 种工具)。虚拟维修工具及数字人体模型如图 7 所示。

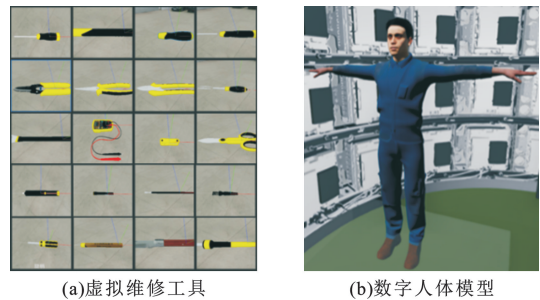


图 7 虚拟维修工具及数字人体模型

## 3.2 虚拟维修性分析评价

### 3.2.1 静态核查和评价

基于虚拟维修样机,采用标记、测量、剖切等方式对整车及设备开展尺寸、空间、布局等方面的静态设计核查,以评价设计与技术要求的符合性。静态核查可实现“点到点、点到面、点到线、面到面以及体到体”的距离、半径、边长的精确测量及最小间隙测量,测量显示精度为 0.01 m。静态核查如图 8 所示。

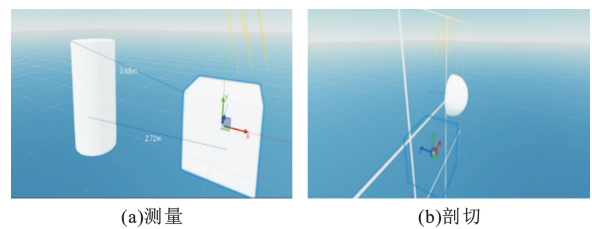


图 8 静态核查

### 3.2.2 交互式维修仿真评价

#### 3.2.2.1 仿真过程

交互式维修仿真评价主要包括可达性、可视性、舒适度、作业分析等方面。首先,配置使用场景仿真参数,操作人员穿上动作捕捉系统,戴上虚拟现实头盔与数据手套,“沉浸”在虚拟维修性设计与评价环境中。然后,驱动人体模型进行组件拆卸与装配,实现交互式维修仿真过程模拟。与此同时,采用可达性包络球进行可达性分析,评价维修部位是否位于维修人员可达的操作范围内;采用虚拟人视锥检测进行维修对象可视性分析,判断维修部位是否位于维修人员视野范围之内;采用碰撞检测进行可操作

性评估,对维修操作空间进行分析;采用添加负载或者指定负载重量评估维修人员作业姿势的舒适度。组件交互式维修仿真评价如图 9 所示。

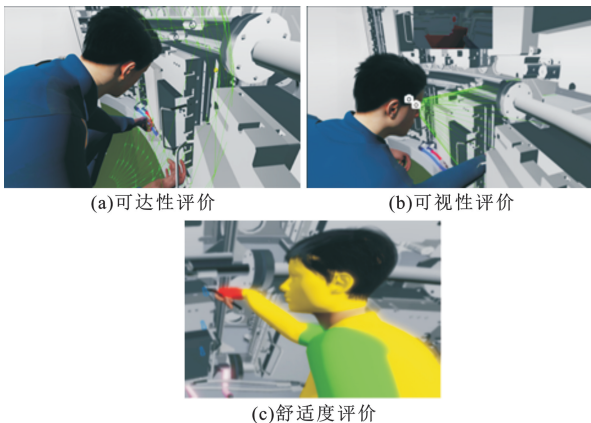


图 9 组件交互式维修仿真评价

### 3.2.2.2 仿真结果

采用灰色模糊算法,根据组件维修各工序的可达性、可视性、舒适度评分结果和维修工时,计算得到组件的维修性设计综合评分值约为 61.3。依据虚拟维修性设计综合评价标准,该组件的维修性设计评价等级为中。因篇幅所限,该组件虚拟维修性设计综合评价结果请用微信扫一扫本文 OSID 码,在“本文开放的科学数据与内容”中查看。

### 3.2.2.3 设计改进建议

根据虚拟维修性分析,从维修性设计、维修工艺设计、培训等方面提出该组件维修性设计改进的建议如下:

#### 1) 维修性设计

①因维修时只有单侧把手可以受力,建议改进该组件紧固螺钉的位置分布。

②因维修空间狭窄,建议研制该组件的专用维修工具。

③因存在维修障碍,建议在可能发生碰撞的部位(如设备机柜转角处)加装防护措施,在监控软件界面上将该组件明显标识为“维修困难”。

#### 2) 维修工艺设计

①将该组件维修人员数量由 1 人增加到 2 人。

②在该组件维修工序中,明确最佳接近路径为:2 人从检修口进入维修空间后从逆时针方向接近。

③在该组件左侧相邻组件的维修工序中,明确

最佳接近路径为:2 人从检修口进入维修空间后,1 人从逆时针方向接近,另 1 人从顺时针方向接近。

#### 3) 加强培训

在使用操作说明书中明确检修口、机柜转角等相关的安全事宜,加强对维修人员的训练,提高维修熟练程度。

### 3.3 结果分析

在工程实践中,实施组件全流程的维修性设计评价通常需组织维修性定性核查和验证试验,配备车辆、天线设备、组件等相关实物以及技术资料,因此,直到系统研制后期才具备开展维修性设计评价的条件。系统的研制成本费  $C_{DC}$  包括研制设计费  $C_{DD}$ 、研制材料费  $C_{DM}$ 、研制外协费  $C_{DH}$ 、研制专用费  $C_{DS}$ 、试验费  $C_{DT}$ 、固定资产使用费  $C_{DP}$ 、研制工资费  $C_{DW}$ 、研制管理费  $C_{DA}$ 、技术协调费  $C_{TH}$ <sup>[15]</sup>。研制成本费模型为

$$C_{DC} = C_{DD} + C_{DM} + C_{DH} + C_{DS} + C_{DT} + C_{DP} + C_{DW} + C_{DA} + C_{TH} \quad (1)$$

依据工程实践和本文实例,采用工程估算、类比估算等方法<sup>[13-14]</sup>,面向组件设计、样件制造、试验环境搭建到维修性试验完成的过程,对资源消耗情况进行统计和分析表明,由于全过程采用数字化手段,相较于传统方法,该组件开展虚拟维修性设计评价的费用降低 68%,工期缩短 61%。详细数据如图 10 所示。

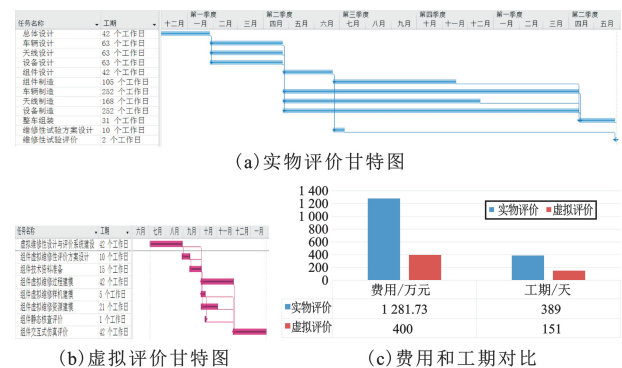


图 10 组件维修性设计实物评价与虚拟评价对比

通常,实物评价的输出成果仅为技术报告,虚拟评价的输出成果除技术报告外,还包括可重复利用的试验过程视频、试验评价视频、虚拟维修资源库和交互式使用操作视频。因此,开展虚拟维修性设计

与评价不仅可以经济、高效地在产品物理实现之前体验产品使用和维修过程、辅助优化维修性设计,而且试验过程生成的视频成果还可直接应用于用户维修操作的仿真训练,实现训练与研制同步,有效提升航天地面测控系统的综合保障能力。

#### 4 结束语

为适应航天装备维修保障数字化、精准化和智能化要求,提高维修性设计和评价在航天地面测控系统研制过程中的及时性和有效性,本文针对航天地面测控系统研制特点,利用国内虚拟现实、信息技术、仿真技术的发展成果,采用虚拟维修性设计与评价系统,设计虚拟维修性设计与评价工作流程,完成了某车载地面测控系统基层级组件的全流程沉浸式维修仿真验证,获得了虚拟维修性设计定量综合评价结果,提高了航天地面测控系统的维修性设计和评价的数字化、规范化和定量化水平。

为提高虚拟维修仿真分析的应用价值,未来将进一步探索实现作业强度、生理、疲劳度、腰脊椎受力等人机工效领域虚拟量化评价的技术途径。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 于志坚. 航天测控系统工程[ M]. 北京:国防工业出版社,2008:12-19.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 郝建平. 虚拟维修仿真实理论与技术[ M]. 北京:国防工业出版社,2008:19-41.
- [ 4 ] 赵博,刘凤财,向彩霞. 航空航天虚拟装配和虚拟维修进展综述[ J]. 导弹与航天运载技术,2016(5):53-57.
- [ 5 ] DATCU D, CIDOTA M, LUKOSCH S, et al. Virtual collocation to support remote assistance for inflight maintenance in ground training for space missions[ C]// The 15th International Conference on Computer Systems and Technologies. New York: ACM, 2014: 134-141.
- [ 6 ] WOLFF R, PREUSCHE C, GERNDT A. A modular architecture for an interactive real-time simulation and

training environment for satellite on-orbit servicing[ J]. Journal of Simulation, 2014, 8(1): 50-63.

- [ 7 ] 张伟,夏侨丽. 空间站维修性系统设计与验证方法研究[ J]. 载人航天, 2014, 20(2): 134-138.
- [ 8 ] 李伟,赵佳,张伟,等. 载人航天器虚拟维修环境的设计与实现[ J]. 航天器环境工程, 2014, 31(1): 102-106.
- [ 9 ] 朱超,孔旭,胡成威,等. 空间机械臂维修性系统设计与评价体系的构建[ J]. 航空学报, 2021, 42(1): 244-252.
- [ 10 ] 朱超,张运,李德伦,等. 空间机械臂关节维修性设计与验证[ J]. 载人航天, 2023, 29(1): 22-28.
- [ 11 ] 吴慧伦. 基于 MBSE 的微波统一测控系统测试性设计[ J]. 电讯技术, 2023, 63(6): 811-816.
- [ 12 ] 俄广西,柴霖,刘云阁,等. 全空域多目标测控天线技术研究[ J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1112-1117.
- [ 13 ] 李旭. 相控阵测控系统瓦式一体化 T/R 组件设计[ J]. 电讯技术, 2023, 63(1): 125-130.
- [ 14 ] 国家技术监督局. 中国成年人人体尺寸: GB 10000—1988[ S]. 北京:中国标准出版社, 1989: 1-17.
- [ 15 ] 中国人民解放军总装备部. 武器装备寿命周期费用估算: GJBz 20517—1998[ S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 1998: 118-157.
- [ 16 ] 中国人民解放军总装备部. 装备费用-效能分析: GJB 1364—1992[ S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 1992: 11-13.

#### 作者简介:

吴慧伦 女, 1971 年生于江苏南京, 1994 年获工学学士学位, 现为研究员, 主要研究方向为航天测控通信、可靠性系统工程。

李威 男, 1989 年生于四川安岳, 2013 年获硕士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为航天测控、系统可靠性工程。

谭祥 男, 1998 年生于四川达州, 2023 年获硕士学位, 现为助理工程师, 主要研究方向为可靠性建模、分析与评估。

柴霖 男, 1969 年生于河南洛阳, 2005 年获博士学位, 现为研究员, 主要研究方向为航天测控通信、航天综合化载荷。

孙飞 男, 1990 年生于四川南充, 2017 年获硕士学位, 现为高级工程师, 主要研究方向为电子设备结构设计与环境适应性设计。

陈梓鸿 男, 2000 年生于广东梅州, 2022 年获学士学位, 现为工程师, 主要研究方向为虚拟仿真制作、分析与验证。