

AR 技术在装备测试性验证试验中的应用研究

张宇^{1,2}, 程中华¹, 连光耀², 赵润泽^{1,3}, 张西山²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 32181 部队, 西安 710032;
3. 陆军装备部驻石家庄地区第三军事代表室, 石家庄 050003)

摘要: 测试性验证试验是确认装备测试性的是否满足设计要求而进行的试验, 对于提高装备测试性水平具有重要作用, 但在验证试验中往往存在装备损坏、测试点限制以及操作人员技术要求高等问题, 因此提出了一种基于增强现实技术的装备测试性验证试验应用研究, 通过 AR 技术对装备进行建模仿真, 将虚拟的配件与现实的装备相互匹配, 使得平面知识转化为虚实结合的可视化立体知识, 增强了验证试验的可视性、可达性以及可操作性, 以此来引导操作人员完成测试性验证试验, 提高验证试验的效率和正确性, 并以某型号无人机为试验验证对象, 证明了增强现实技术可以为实现装备测试性设计改进工作提供有效决策支撑。

关键词: 测试性验证试验; 增强现实技术; FMECA 分析; 验证演示系统; 无人机装备

Application and Research of AR Technology in Equipment Testability Verification Test

ZHANG Yu^{1,2}, CHENG Zhonghua¹, LIAN Guangyao², ZHAO Runze^{1,3}, ZHANG Xishan²

(1. Department of Equipment Command and Management, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710032, China; 3. The Third Military Representative Office of The Army Equipment Department in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Testability verification test is verified whether the testability of equipment meets design requirements, which plays an important role in improving the testability level of equipment. However, there are often the problems of equipment damage, test point limitations, and high technical requirements for operators in verification tests. Therefore, an application study of equipment testability verification test based on augmented reality (AR) technology is proposed, the AR technology is used to model and simulate equipment, and match the virtual accessories and real equipment each other, planar knowledge is transformed into visualized three-dimensional knowledge by the combination of virtual and reality, enhancing the visibility, accessibility, and operability of verification tests, guiding operators to complete testability verification tests, improving the efficiency and correctness of verification tests, and taking certain unmanned aerial vehicle as the test verification object, It is proved that the augmented reality technology can provide an effective decision-making support for the implementation of equipment testability design improvement.

Keywords: testability verification test; augmented reality technology; FMECA analysis; verify the demonstration system; UAV equipment

0 引言

测试性属于装备通用质量特性, 是反映装备保障效能水平的重要因素, 测试性验证是为了确认装备是否实现了测试性设计要求而行进的试验验证, 需要从多个方面对装备设计工作进行评估^[1], 但是在试验过程存在需要进行故障注入等对装备具有一定破坏性的行为, 以及操作人员要求必须熟练掌握装备各项指标性能等诸多问题, 为装备测试性验证试验增加了一定的困难和不确定因素。而增强现实 (AR, augmented reality) 技术在改善测试过程和提高测试保障质量方面具有独特的优势, 因此在装备测试性验证

试验中有着广泛的应用前景, 可以为研究者提供更加准确、可靠的测试结果。

结合实物验证和虚拟验证的优缺点, 提出了运用增强现实技术的装备测试性验证试验方法。首先需要完成装备测试性验证试验的相关前置工作, 如装备的 FMECA 分析、测试性建模、故障注入和测试过程建模等, 为增强现实技术应用于测试性验证试验奠定基础; 其次构建可用于装备测试性设计、分析、验证、评估的虚拟样机; 而后构建装备虚拟试验环境, 包括电子装备虚拟试验设备、虚拟故障注入设备、虚拟测试设备、虚拟诊断系统等环境要素; 最

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-06-11。

基金项目: 国家自然科学基金(71871219); 国防预研项目(50904020501)。

作者简介: 张宇(1994-), 男, 大学本科, 助理工程师。

程中华(1972-), 男, 博士, 教授。

通讯作者: 连光耀(1980-), 男, 博士, 高级工程师。

引用格式: 张宇, 程中华, 连光耀, 等. AR 技术在装备测试性验证试验中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 49-56.

后在完成测试性验证试验后,采用科学的方式对获取的试验数据进行合理地水平评估。其流程如图 1 所示。

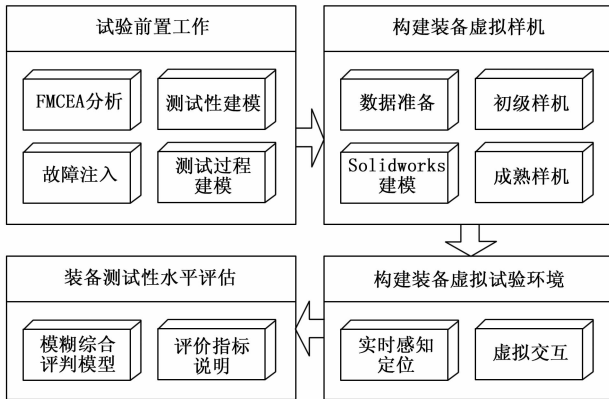


图 1 方法流程图

通过针对装备的建模仿真,使虚拟装备和实际装备相互匹配,虚拟的配件和现实的装备相互结合^[2],在进行验证试验时就会非常灵活,无论是装配位置还是装配时间都会更加精准,试验的可达性、可观性更加精确,时间相关的指标也会相对变得更加真实。同时,增强现实技术可以使电路中的电信号具象化,将视觉可见的物理机械运动与视觉看不见的电流运动相结合,增强了验证试验的可视性、可达性以及可操作性,强化了操作人员的熟练度,提高了测试性验证试验的效率和正确性,从而实现装备测试性的增长。

1 研究现状

1.1 测试性验证试验概述

目前常见的装备测试性验证试验主要有以下两种:

1) 实物验证。主要是借助故障注入设备,通过使用特定的测试方法,对装备进行故障注入,从而得到相关指标数据。文献 [3] 为了解决现行导弹检测性验证试验方法存在的样品量较大的实际问题,给出了一个基于序贯网图检验(SMT)的新方法;文献 [4] 以某型舰炮制导弹药为例,采用贝叶斯网上多树传递计算,建立等效故障关系矩阵,以此来替代无法提供的故障,从而提高验证结果的可靠性。实物验证的优点在于得到的试验数据最真实可信,但是缺点也很明显,试验往往对装备具有损伤性甚至是破坏性,试验成本和试验风险较高;同时故障注入的位置在很多情况下会受到一定的限制,导致无法准确地注入到对应的位置,造成试验结果不够全面和准确。

2) 虚拟验证。运用建模仿真技术,对虚拟样机上进行故障注入、虚拟测试、故障检测及隔离等来完成验证。文献 [5] 采用多智能体仿真技术构建出一个能够模拟其结构、功能和运行状态的虚拟模型,以满足不同应用场景的需求,为测试性验证提供了一种高效的验证新途径;文献 [6] 通过数字孪生技术,建立了一套完善的测试性验证流程和方法。虚拟验证具有零风险、费用低、可重复注入、注入位置不受限等优点,但是由于进行虚拟验证时,建立

虚拟样机只能对装备的可视性、可装配性等指标进行验证,因为虚拟的模型都是固定的模型,并未考虑外部环境等因素,比如配件装配等问题都是理想化的,但是实际装配未必可以成功;同时针对时间的指标并不准确,在装配时间跟真实装配的时间在外部条件不同的情况下,很多时候下也并不一样,导致虚拟试验数据可信度并不高,这就是虚拟验证的弊端。

1.2 增强现实技术概述

AR 技术是以虚拟现实(VR, virtual reality)技术为基础发展的,不同于 VR 技术的完全虚拟的环境,AR 技术的“增强”,能够让使用者在虚拟环境中感受到现实世界,它通过将电脑产生的数据结合在现实世界中,使用户能够通过视觉、听觉和触觉感知到本不可见的虚拟物体,并且能够自动识别环境中的实物,将其相关数据实时结合,从而更好地理解现实世界,为用户提供更多的支持。

AR 技术因其能够虚实融合的特点,在提高维修引导和保障质量等方面有着独特的优势,国内外学者也进行了相关的研究,文献 [7] 为了解决装甲装备基层级维修检测设备的重量过重、缺乏实时的维修指导以及无法与自然环境进行有效交互等问题,设计了一种可穿戴式的增强现实维修指导系统,从而满足基层人员对坦克火控系统维修的需求;文献 [8] 针对部队由于人员流动和装备更新导致士兵对火箭炮出现故障后难以解决的问题,提出了将增强现实应用在火箭炮维修中,对火箭炮的维修保养提供一种新的解决思路;文献 [9] 针对由于人为操作错误影响航空运营和运输安全的问题,提出了将增强现实技术应用于飞机维修培训和运营,通过使用交互式 and 可穿戴可视化装置等设备构建系统,有效减少了由于程序违规或培训不足而导致的错误。不过相关的文献更多是关注于维修领域的研究,针对增强现实技术在装备测试及测试性设计领域的研究相对较少,因而在装备测试性验证试验中有着广泛的研究前景。

2 前期准备工作

2.1 装备 FMECA 分析

故障模式影响及危害性分析(FMECA)是装备测试性验证的基础,为装备测试性验证试验提供故障样本,包括故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)两部分^[10]。针对现代装备的电子集成度较高,故障模式可能由一个或多个失效机理引起,利用热失效分析等传统手段已无法有效对电子装备进行深层故障模式分析而导致试验样本可信度降低的问题,提出了基于失效物理(PoF, physics of failure)模型和故障树(FTA, fault tree analysis)相结合的改进 FMECA 分析方法,首先通过分析电子装备中电子元器件的失效机理和失效模型,完成对电子系统底层电子元器件在不同失效机理下的故障模式故障率和危害度的计算,得到 FMECA 结果;然后通过建立电子装备故障树,利用故障树定量分析法得到顶事件发生概率以及各底事件(器件级故障模式)的概率重要度,通过与各电子元器件危害性比较后验证 FMECA 结果的正确性。此方法利用危害

度与故障树概率重要度定义的相通性, 将二者的优先排序进行比较, 以彼此相互验证的方式来共同验证 FMECA 结果的真实性和准确性, 最终得到电子装备更加准确的 FMECA 结果, 具体流程如图 2 所示。

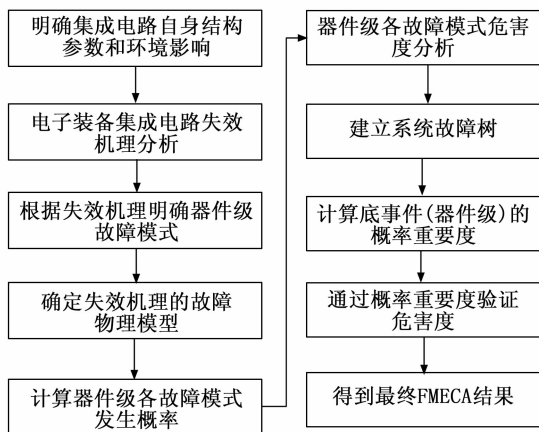


图 2 分析流程图

2.2 装备测试性建模

通过测试性模型, 可以对装备进行全面的测试性分析, 从而更好地制定出有效的诊断策略, 能够优化测试流程, 得到最佳测试方案。多信号流图模型 (MSFG) 能够一目了然地表达系统内部组件相互之间的联系, 以及问题系统与试验点相互之间的联系, 这种建模方式能够大大降低模型复杂性, 节省模型成本, 为大规模复杂的模型提出了一种新的思路, 是目前使用最广泛的测试性模型方式。

基于系统结构和功能分析, MSFG 通过分层有向图来描述信号流的方向和各组元之间的组成及连接关系, 并且定义信号与组元之间的关联性, 以及测试与信号之间的关联性, 从而建立一个描述系统故障、功能和测试之间关系的模型。多信号流建模基本步骤如图 3 所示。

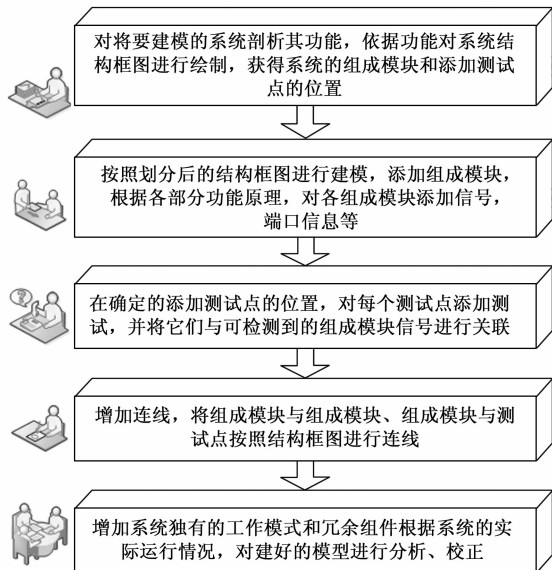


图 3 分析流程图

在系统测试性建模中, 尤其是大型复杂系统, 模型之间的关系非常复杂, 不同层级之间、同一层级之间、模块与测试之间以及模块与故障模式之间的关系都需要精确的模拟, 以便更好地解决各类问题。

2.3 装备故障注入

通过采用特定的模型, 故障注入技术可以将可能出现的故障信息传输到特定的测试对象中, 实现故障诊断, 以加速该对象错误产生或失效发生。故障注入能够为装备测试性试验提供故障输入, 是装备进行测试性试验的前提。

为完成对被测对象的故障注入试验工作, 必须为其提供包括工作环境信号、部件之间交联信号等激励信号, 驱动相应 LRU (line replaceable unit) 或 WRA (weapons replaceable assemblies) 运行, 从而实施准确的故障注入试验。通过建立基于信号模型的故障模拟技术, 我们可以对装备的故障进行有效的注入试验, 并利用该模型对故障信号进行准确的描述, 从而实现硬件或软件的自动检测, 从而更好地预测故障的发生。

为保证测试性试验的有效性和安全性, 故障注入试验开始前需要制定完整的试验方案, 故障注入试验方案设计是整个故障注入试验的基础。其内容如图 4 所示。

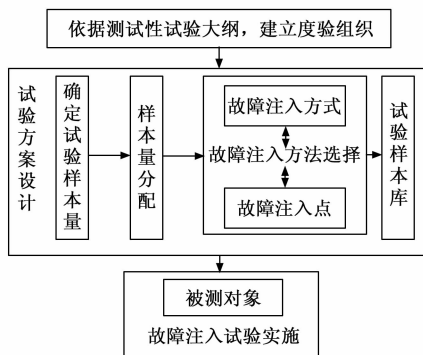


图 4 试验方案内容

2.4 装备测试过程建模

测试过程建模是对装备测试性验证试验的操作流程进行建模。根据装备故障诊断策略可以构建装备测试树, 测试过程是以测试开始时刻为初始状态, 根据测试的规则, 触发相应的测试活动, 并推进测试的进程, 直到测试任务完成。具体步骤如图 5 所示。

由图 5 可知, 在测试作业中, 状态是触发测试作业的条件, 测试作业是改变系统状态的基本原因, 通过测试作业的虚拟测试, 分析测试过程的各个测试活动, 最后验证和评估装备的测试性。

3 基于增强现实的装备虚拟样机建模

装备虚拟样机是进行虚拟试验的对象, 能够和真实装备进行叠加, 实现基于增强现实的试验验证。对虚拟样机建模的研究是一个系统而复杂的过程, 主要包括 5 个方面, 如图 6 所示。

虚拟样机建模的过程分为 3 个阶段, 分别是数据准备

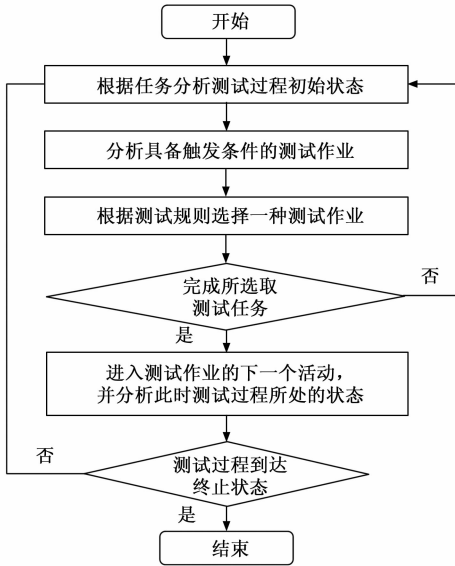


图 5 测试过程建模步骤

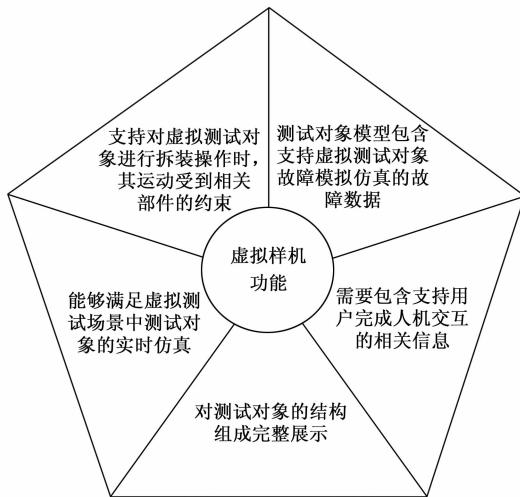


图 6 虚拟样机建模内容

阶段（提取 CAD 几何数据、装配信息，根据测试工程分析确定测试任务，设定测试过程）、样机初级阶段（明确样机的几何模型，进行 CAD 几何数据转换与简化，完成几何建模）、样机成熟阶段（融合拆卸过程信息、人机交互信息等可以进行测试任务的样机）。

测试对象及其零部件的几何和装配约束信息可以通过常用的计算机软件 Solidworks 来完成，这是一款功能强大、组件丰富的计算机辅助设计软件，具有强大的参数化设计功能，可集成产品设计、制造和生产管理。在熟练掌握三维建模方法和三维建模思维以及理解数据驱动下，使用 SolidWorks 设计效率非常高^[11]。通过这款软件，可以轻松实现零部件的建模。首先，可以通过精确的参数调节，构筑出拥有独立的形状和结构的原始草图；接着，可以利用多种形状和结构的参数，构筑出能够体现原始形状和结构的复杂形状；最后，可以通过增强和改变形状和结构，

来实现更精确的零部件设计。经过不断地研究与改善，我们发现了许多有助于改善设计的策略。首先，应当仔细研究零部件的基本特性，以此来提升设计的效率；其次，应当尽量利用实体转换命令来处理截面草图，并从已有的实体特征中选择最佳的图形；最后，应当将所有零部件的命名都放置到相应的文档夹，以便更加容易地检索。通过对设备设计图纸的结构组成进行精确建模，以及准确定义各零部件的装配关系，可以有效地生成图片或视频文档，这是实现轴设备设计和工艺规划的关键步骤。

4 基于增强现实的装备试验环境建立

围绕装备的测试性验证等工作要求，利用增强现实技术，建立一个包含装备虚拟样机、测试工具设备、测试过程信息的虚实结合的测试环境，实现基于增强现实的测试性验证。在此构建基于增强现实的虚实结合的环境，需要增强现实技术的支撑。

增强现实框架如图 7 所示，分别为显示模块、跟踪模块、环境渲染模块和交互模块，各模块的功能互不相同，通过完成各自的任务，实现对装备试验环境的建立。

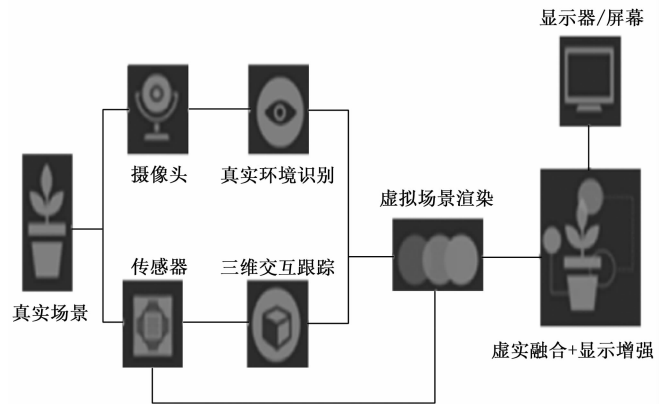


图 7 增强现实框架

从图中可以得出，首先通过显示模块手机现实场景的视频或图像作为信息输入，然后通过跟踪模块来对虚拟环境和现实环境的相对位置进行定位，最后通过环境渲染模块和交互模块将虚拟与现实相结合，并通过交互式显示设备实现人机交互^[12]。

4.1 实时感知定位技术研究

为了实现目标设备的空间定位，有必要解决“我在哪里”的问题。SLAM 技术是三维感知的基础技术，主要用于机器人的自主定位和导航或使用视觉解决方案^[12]。本文主要采用基于单目视觉的 SLAM 技术，其构建流程主要包含前后两端，首先，从图片中获取特点，形成相应的描述子，然后，根据对比左右几张图片的特点，判断出情景中的一些重要特征点，并利用图片变化规律来反向推算摄像机头的运动，从而实现对情景的准确捕捉。主要包含特征点提取、特征点匹配、相机位姿检测识别以及系统场景构建等步骤^[12]，其中系统场景构建的算法步骤如图 8 所示。

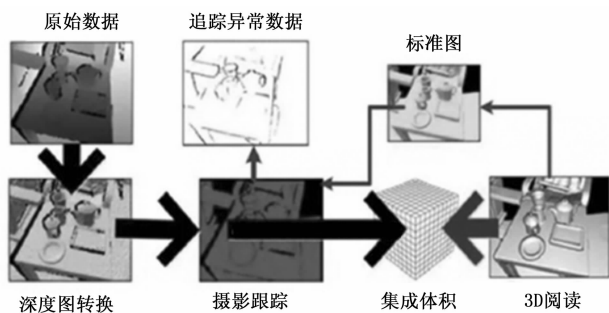


图 8 系统场景构建步骤

4.2 虚拟交互技术研究

系统其主要分为手势交互技术和语音交互技术。手势交互是自然交互系统设计与全息图像交互的一种重要且广泛使用的方式。手势交互方法的设计将直接影响机械零部件拆装过程的真实性和准确性。为了让用户获得最佳的交互效果,必须充分认识到任何潜在的挑战,仔细研究每一个步骤,确保它们都被妥善处理,从而提供一个最佳的体验。语音交互是自然交互中与全息图像交互的另一种重要且广泛使用的方式^[13]。将凝视获取与交互对象相结合,对象的语音操作使交互更加自然和方便。虚拟交互技术具体研究内容如图 9 所示。

5 装备测试性评价

前文通过对前期准备工作、虚拟样机建模以及试验环境搭建所需要的关键技术进行介绍,证明了 AR 技术在装备

测试性验证试验中具有重要的应用价值,为进一步证明 AR 技术能够有效提高验证试验的效率和正确性,还需要通过 AR 技术对装备测试性展开评价工作。

5.1 评价指标确定

装备测试性评价主要根据 GJB2547 和 GJB2072 有关标准对一系列评价指标进行计算。主要包含故障检测率、故障隔离率、平均故障检测时间、平均故障隔离时间及平均故障修复时间等^[14]。除此之外,基于增强现实技术,还应该包含操作人员可达性、可视性和工作姿态分析等方面的评价分析。

可视性分析是检验测试部位是否在操作人员视线可以达到的范围内,使操作人员方便进行测试活动;可达性分析是检验工具或手是否能够沿一定路径或方式,接近测试部位。操作人员的可操作性分析是指工具或手有足够的空间完成相应的测试动作。

在测试中,操作人员可视性是指他们能够清楚地看到测试部位,而且不会被任何工具遮挡。通过使用视锥,可以实时显示测试人员的视野。如果测试区域位于最佳、最大和最小视野之间,那么它们的可视性就会被评定为良好、一般或较差。在实验室里,操作人员可以使用手或工具来完成测试,并且可以获得充足的空间。

操作人员的可达性根据人员在测试过程中接近测试位置的能力来确定,并根据包络球的覆盖面积来判断。在仿真过程中,如果操作工具在包络球内,则可达性好,反之则可达性差。

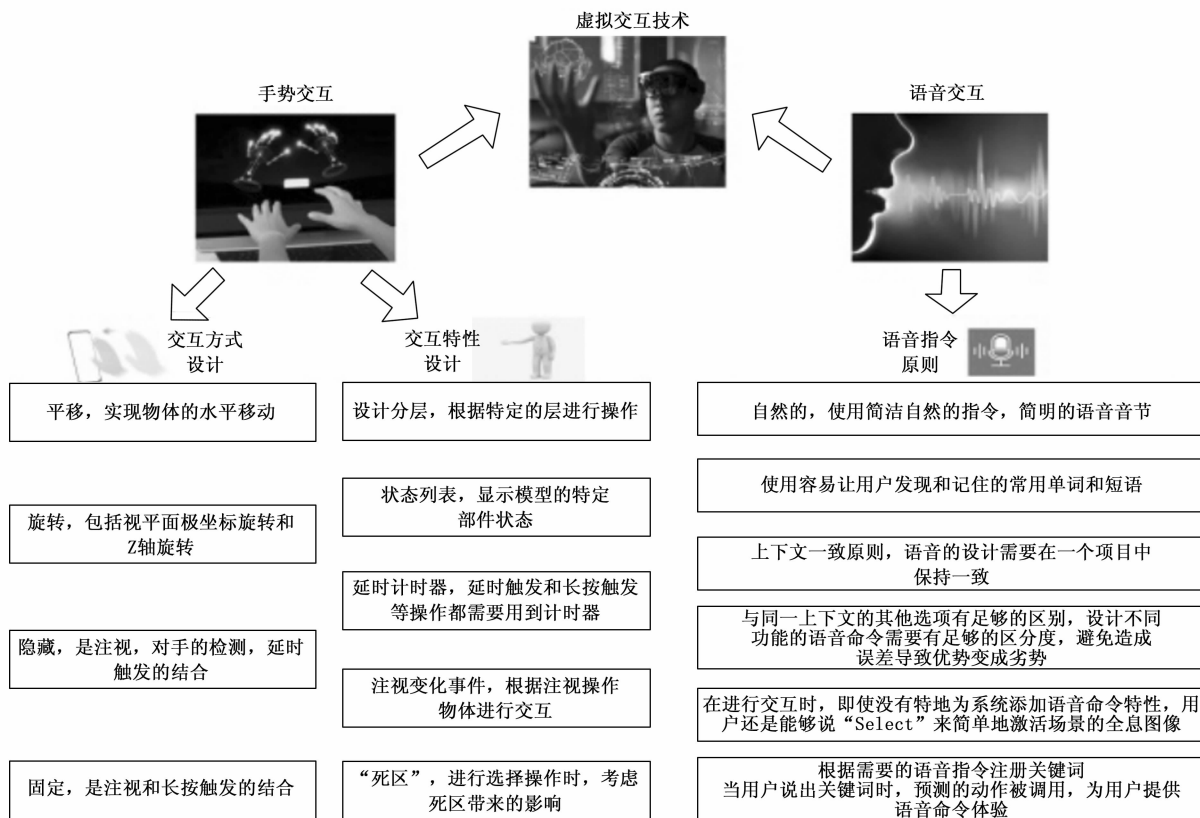


图 9 虚拟交互内容

通过姿态分数分析，操作人员可以评估自身的身体姿势，以确保其处于最佳舒适状态。此外，该系统还可以根据评估结果，对得分较低的肢体姿势进行优化，以提高整体的舒适度。通过使用 RULA，我们可以快速、准确地评估上肢损伤的危险因素并通过使用不同颜色来表示每种姿势的得分情况，从而更加直观地了解虚拟人的肢体位置^[15]。

5.2 评价模型确定

本系统使用模糊综合评判模型。首先，为了准确评估武器系统测试性分配的效果，需要从多个角度出发，综合考虑重要性、复杂性、平均故障修理时间、故障影响系数以及成本系数等因素，以确定最佳测试性分配方案^[16]。重要性（U1）是根据各个子系统的重要性来衡量的，重要性越高，就需要更多的测试资源。而复杂性则是根据各个子系统的元件数量和组装难度来衡量的，复杂度越高，就需要更多的故障资源。MTTR（U3）是衡量系统可靠性的重要参数，它可以反映出系统在发生故障后的可靠性，因此，在设计项目时，应该给予 MTTR 值较低的指标，而故障影响系数（U4）则是衡量系统可靠性的重要指标。根据故障检测和隔离的成本，我们可以计算出成本系数（U5）。为更好地评估故障的影响，应给予更高的测试性指标，以便有效地检测和隔离^[17]。

然后建立由 p 个评价结果组成的评价集：

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_p\}$$

再对各因素分配权值，建立权重集：

$$A = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_m)^T$$

其中： $A_j = (a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}, \dots, a_{jm})^T$ ，其中 a_{ij} 为第 j 个因素对第 i 个分系统的加权值^[18]。

通过建立单因素评价矩阵，将 n 个分系统分组，并且让具备丰富实践经验的专业人士对每一组的重要性、简单性、可靠性、适应性和持续性等因素给出评分，每一项的得分均以 10 分的形式表示，其中，对于某一项的评分越高，其得分越少^[19]。通过综合运用多种技术手段，我们能够最大限度地提高评估的精度和公正性^[20]。矩阵 R 为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

最后构建模糊模型，计算 b_j 为：

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} r_{ij}, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

则第 j 的分系统的评分系数为 c_j ：

$$c_j = \frac{b_j}{b} \quad (3)$$

式中， b_j 为第 j 个系统的评分数， b 为系统的评分总数^[21]，即：

$$b = \sum_{i=1}^m b_i \quad (4)$$

由考虑重要度和复杂度的分配方法中的公式得分配给每个分系统的可靠度为：

$$R_j = 1 - \frac{1 - R_j^0}{1} \quad (5)$$

其中： R_j^0 为系统规定的可靠度指标。

通过采用模糊综合评判的方法，我们可以全面考虑虚拟现实系统的测试性，并将各个影响因素的权重定量化，从而更加客观、实际地反映出测试性分配的整个过程，从而更好地实现增强现实系统的有效运行。

6 试验验证

本文以某型号无人机为典型试验案例，运用基于 AR 技术的装备测试性试验验证系统，为装备的使用和操作人员提供一个测试性验证平台，使被试人员了解基本的测试流程，能够在真实环境中检验装备的测试性，并最终完成对装备的测试性的综合验证评估。

系统主要架构是基于 HoloLens 的装备测试性虚拟试验验证系统，装备测试的仿真环境运用 C/S 架构进行搭建，以 HoloLens 为客户端、计算机为服务端，信息通过 IP 地址和端口号进行传输^[3]。客户端的功能主要是人机交互、模型加载、空间映射和信息收集。服务端的主要功能是提供虚拟信息和执行设备测试任务，信息传输使用 UDP 协议进行通信。

6.1 前期准备

首先针对无人机系统，构建无人机系统的装备结构树，构建完成的装备结构树如图 10 所示。

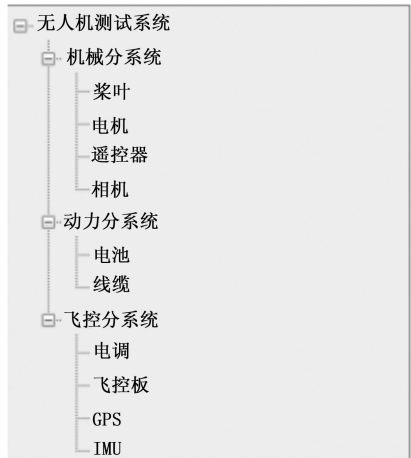


图 10 无人机结构树

在装备结构树的基础上，进行前文中 FMECA 分析等相关前置工作，形成无人机多信号流图模型、诊断策略和维修树等相关信息，以无人机失稳作为故障模式为例，FMECA 分析设置如图 11 所示。以动力分系统为例，多信号流图模型如图 12 所示。装备的诊断策略如图 13 所示。无人机维修树如图 14 所示。

6.2 虚拟样机建立

此外需要根据无人机设计图纸的结构组成，对其零部件进行精确建模，并对建模后各零部件的装配关系进行正确定义，本文主要采用 Solidworks 建模软件，无人机模型



图 11 IFMECA 分析表

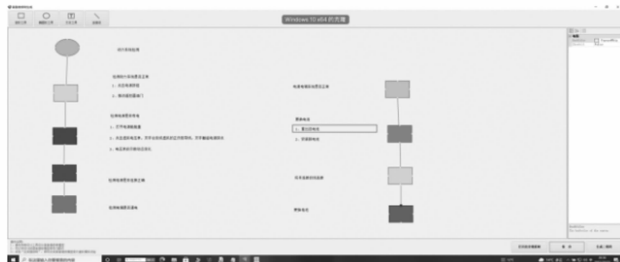


图 14 无人机维修树

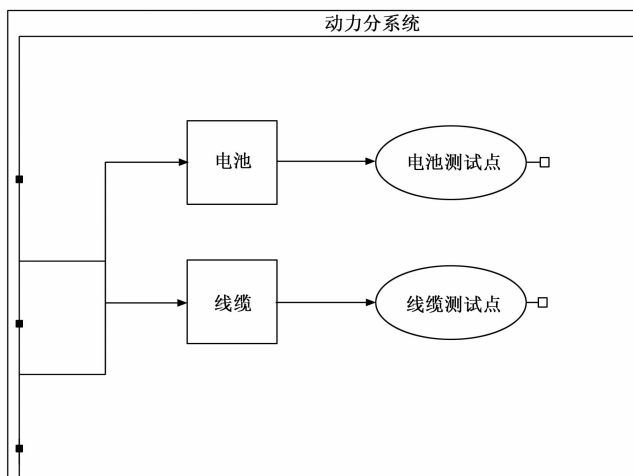


图 12 动力分系统多信号流图

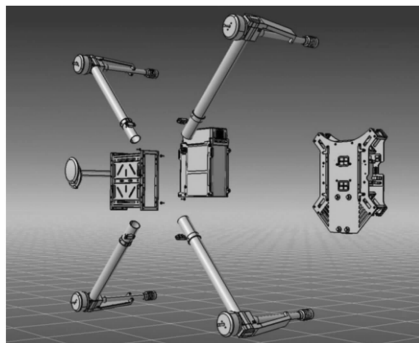


图 15 无人机模型的三维效果图

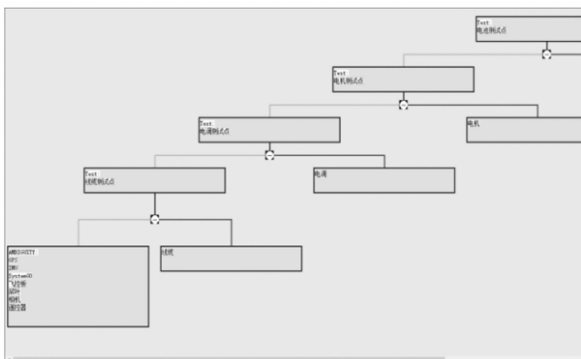


图 13 诊断策略

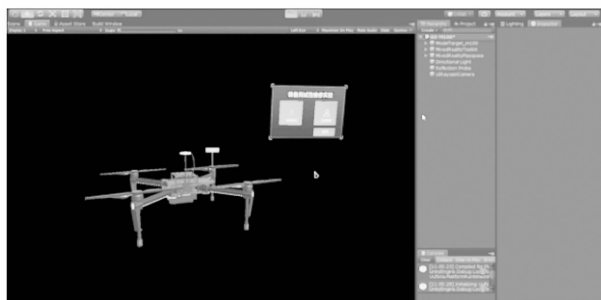


图 16 环境界面

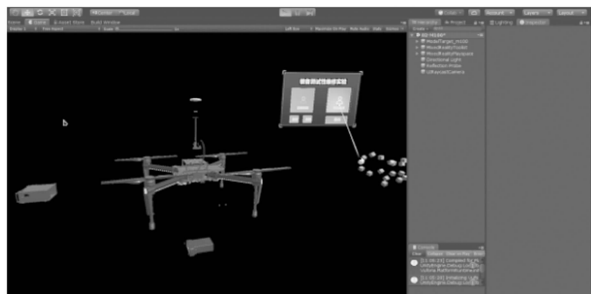


图 17 无人机检测界面

的三维效果如图 15 所示。

6.3 试验环境建立

运用 HoloLens 虚拟现实软件, 将包括无人机装备参数和三维模型等相关信息导入其中, 打开后环境界面如图 16 所示。

6.4 装备测试性评价

系统根据设定的故障模式, 进行电池、线路和发电机等区域的检测, 检测界面如图 17 所示。

当整个测试过程完毕后, 会弹出装备测试性指标评价界面, 如图 18 所示。

最终可根据系统的评价信息进行装备测试性改进等相关工作。

7 结束语

本文重点论证了增强现实技术应用于装备测试性验证试

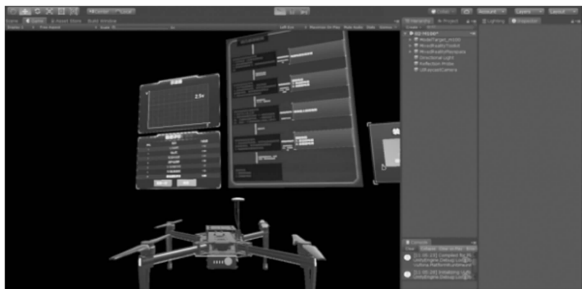


图 18 评价界面

验的可行性,分析了其中所需的关键步骤及技术支持,最后通过某型无人飞机为典型试验案例,验证了增强现实技术因其虚实融合的优势,可以有效解决装备测试性实装验证和虚拟验证中各自存在的弊端,进而验证装备的测试性设计是否达到指定要求,为改进测试性验证方法提供科学依据和指导,也为装备测试性验证试验提供有效的参考和支撑。

参考文献:

- [1] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] 张乐. 基于 HoloLens 的增强现实识别系统 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [3] 肖支才, 王康, 史贤俊, 等. 基于 SMT 方法的测试性验证试验方案设计 [J]. 测控技术, 2019, 38 (11): 47-51.
- [4] 颜世刚, 齐亚峰. 测试性验证试验的故障注入方法优化研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 97-101.
- [5] 文昌俊, 陈立, 张金良, 等. 基于智能体的雷达测试性虚拟验证系统研究 [J]. 现代雷达, 2020, 42 (10): 1-6.
- [6] 袁剑平, 李近, 孙寒冰. 基于数字孪生的测试性验证技术 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 256-259.
- [7] 张雷, 马金盾, 郭理彬, 等. 增强现实在装甲装备基层级维修中的应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (12): 268-274.
- [8] 贾文泽. 基于增强现实的火箭炮维修辅助系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

(上接第 48 页)

- [24] 刁少波, 业渝光, 张剑, 等. 时域反射技术在地学研究中的应用 [J]. 岩矿测试, 2005 (3): 205-211, 216.
- [25] FELLNER-FELDEGG H. Measurement of dielectrics in the time domain [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1969, 73 (3): 616-623.
- [26] TOPP G C, YANUKA M, ZEBCHUK W D, et al. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments incoaxial lines [J]. Water Resources Research, 1988, 24 (7): 945-952.
- [27] 于建秀. 单导体传输线理论与技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [28] CHEN Y P, OR D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity [J]. Water Resources Research,

- [9] DE CRESCENZIO F, FANTINI M, PERSIANI F, et al. Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2010, 31 (1): 96-101.
- [10] ZENG L, WANG X L. Research on the FMECA method suitable for testability test [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34 (3): 54-60.
- [11] 王琛, 张佳音, 郑冷汐. SolidWorks 软件在计算机辅助产品设计教学中的应用与探索 [J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49 (2): 66-68.
- [12] 李玄基. 基于 HoloLens 增强现实的关键技术研究及实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [13] 王蕾. 基于混合现实的虚拟拆装系统的设计与实现 [D]. 沈阳: 中国科学院大学 (中国科学院沈阳计算技术研究所), 2020.
- [14] QIU W, LIAN G, ZHOU P, et al. Test sample allocation method for testability verification test [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2020, 36 (5): 1592-1603.
- [15] 王瑶瑶, 周博, 任淑红, 等. 基于 Delmia 的盾构虚拟维修仿真与评价技术研究 [J]. 工程机械, 2020, 51 (9): 13-17, 6.
- [16] 王光辉, 徐光达, 谢宇鹏, 等. 区间数模糊综合评判的UCAV空战威胁评估 [J]. 现代防御技术, 2018, 46 (6): 1-6.
- [17] 赵正海, 王宇. 模糊综合评判在装备软件质量评价中的应用 [J]. 现代电子技术, 2010, 33 (24): 45-46.
- [18] 赵帅, 韩国柱, 汪伟. 基于模糊层次评判的火炮测试性分级评估 [J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37 (2): 78-83.
- [19] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (1): 68-73.
- [20] 邱文昊, 连光耀, 张西山, 等. 基于 DSMT 和模糊综合评判的健康状态评估方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3697-3700.
- [21] 雷昭霞, 刘红伟, 韩远鹏. 模糊综合评判法在测试性指标分配中的应用 [J]. 中国高新技术企业, 2013 (10): 35-36.
- [22] 2006, 42 (6): 24-38.
- [29] 方陈剑. 基于双脊波导传输线的海水介电常数研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2020.
- [30] REVIL A. Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer [J]. Water Resources Research, 2012, 48 (2): 1-23.
- [31] 牛佳乐, 邢兰昌, 魏伟, 等. 基于宽频电阻抗特性与阿尔奇公式的含水合物饱和度计算模型 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 250-255.
- [32] 孟祥军, 王进旗. 同轴线传感器优化设计 [J]. 大庆石油学院学报, 2005 (4): 76-78, 97-143.
- [33] 王建伟. 基于介电/磁损耗材料结构设计及其电磁波吸收性能研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [34] 黄威, 王轩, 李永清, 等. 微波吸收材料电磁特性响应规律及影响因素研究进展 [J]. 材料导报, 2023 (7): 1-20.