

# 工程装备虚拟维修技术研究现状与展望

肖智<sup>1</sup>, 何思俊<sup>2</sup>, 支锦亦<sup>2</sup>, 王超<sup>2</sup>

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2.西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 针对工程装备设计的维修性难以验证, 维修训练面临装备昂贵、不易重复拆卸、危险性高等问题, 运用虚拟维修技术来评估装备的维修性和开展维修训练。**方法** 进行文献分析, 理清虚拟维修的研究范畴和热点, 从维修性设计、维修训练两个应用层面和虚拟人技术、虚拟样机及环境技术、维修过程与交互技术、维修性评估技术四个关键技术层面入手, 对相关研究成果进行了整理和综述。**结论** 分析了目前研究存在的不足, 提出了还可以进一步发展基于传感器技术的沉浸式交互方式, 完善核心软件技术, 研究多人协同维修与团体评估方法。

**关键词:** 虚拟维修; 人机设计评价; 工程装备

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)18-0012-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.18.002

## Research Progress and Prospect of Virtual Maintenance Technology for Major Technical Equipment

XIAO Zhi<sup>1</sup>, HE Si-jun<sup>2</sup>, ZHI Jin-yi<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>2</sup>

(1.CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2.Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to evaluate the maintenance of equipment and carry out maintenance training with virtual maintenance technology to solve problems such as difficulty in maintainability verification of engineering equipment design, expensive equipment, difficult duplicate dismantling, high risk and so on in maintenance training. Literature analysis was carried out to clarify the research scope and hot spots of virtual maintenance. The related research results were sorted out and summarized from two application levels of maintainability design and maintenance training and four key technical levels of virtual human technology, virtual prototyping and environment technology, maintenance process and interaction technology, maintainability evaluation technology. The shortcomings of the current research are analyzed. It is proposed that the immersive interaction mode based on sensor technology can be further developed, the core software technology can be perfected, and the methods of multi-person collaborative maintenance and group evaluation can be studied.

**KEY WORDS:** virtual maintenance; human-machine design evaluation; engineering equipment

虚拟维修 (Virtual Maintenance) 是以现代信息化技术为依托, 在虚拟的人—机—环境数字场景中, 通过驱动数字人体模型完成仿真维修过程, 并评估装备部件的可视性、可达性、空间排布合理性、人体姿势舒适程度、维修所需时间及维修难易程度的技术<sup>[1-2]</sup>。

工程装备是指航空航天、海洋工程、轨道交通、军事武器、工程机械等大型复杂装备, 传统的装备维修技术主要通过图纸分析和实物演示, 培训维修人员或验证装备的维修性设计。图纸分析缺乏直观性和准确性, 验证结果可信度不高, 与实物操作在体验上差

收稿日期: 2019-08-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB1201103-9, 2017YFB1201103-10, 2017YFB1201103-11, 2017YFB1201103-12)

作者简介: 肖智 (1976—), 男, 湖南人, 中车青岛四方机车车辆股份有限公司高级主任设计师, 主要从事轨道交通装备工业设计方面的研究。

通信作者: 何思俊 (1990—), 男, 四川人, 西南交通大学博士生, 主要从事工业设计和人因设计评价方面的研究。

距很大。而实物样机制造周期长，费用高，不宜反复拆卸或拆装，危险性高，不利于维修训练的开展，一旦发现维修性问题，更改成本巨大<sup>[3]</sup>。而在设计阶段就合理安排装备部件布局，充分考虑维修工序和与维修人员的交互关系，对提升维修效率、降低疲劳和作业风险有着重要意义。

将虚拟维修引入重大技术装备的维修工程，突破了传统装备维修在经费、空间、时间上的限制，能在方案研发早期，就同时开展装备可用性和维修性的并行设计。近年来，随着计算机技术、通信技术、虚拟现实技术等信息化技术的发展，以及国家对重大型装备研发投入的加大，虚拟维修在应用领域和关键技术上有了新进展。

1 虚拟维修概述

1.1 研究范畴

虚拟维修与虚拟装配、虚拟制造在研究的意义、内容 and 应用范畴上有不小区别。虚拟装配侧重解决装备零部件的装配顺序、装配尺寸和公差等工程问题；虚拟制造则针对装备方案设计阶段和制造阶段

面临的问题进行研究<sup>[4]</sup>。虚拟制造和虚拟维修都包含虚拟装配，但虚拟维修过程中人是主体，研究的重点是维修人员的视域、可达域、动作姿态、疲劳负荷、时间效率等人因问题。因此，一套完备的虚拟维修系统必需具有：完全真实表达装备样机、维修环境和维修工具的功能；逼真模拟维修人员身体物理特征及其操作行为的功能；反馈碰撞、干涉、时间等维修过程信息及结果的评估与分析功能。虚拟维修的研究内容见图 1。

1.2 文献分析

在 Engineering Village (EI) 和 CNKI 数据库中分别以"Virtual Maintenance"和“虚拟维修”为关键词进行检索。截至 2019 年 8 月 21 日，EI 中有全文结果 6322 条，其中期刊文献 2074 篇，1990 年以前有 192 篇，从 1990 年起发文章量逐渐增加，以此为节点，随着计算机技术发展在 2005 年前后形成波峰，从 2010 年开始，随着信息传输速度、虚拟现实等信息化技术的再次突破，虚拟维修的文献数量呈现第二次快速上涨，见图 2。

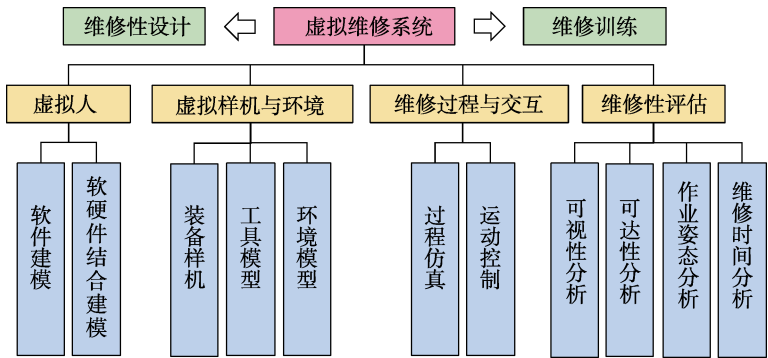


图 1 虚拟维修的研究内容  
Fig.1 Research content of virtual maintenance

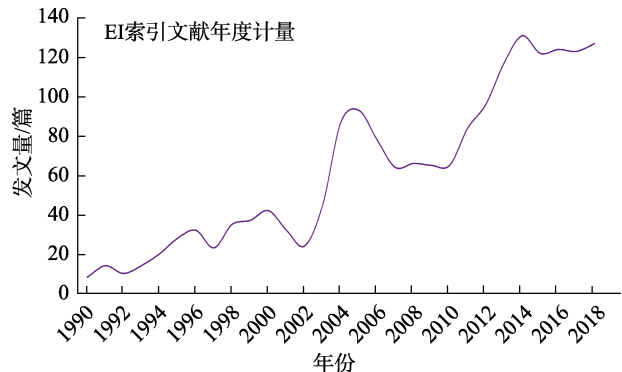


图 2 EI 索引文献年度计量  
Fig.2 Annual measurement of EI index literature

从 EI 控制词汇表 (Controlled Vocabulary) 排名前十的关键词统计来看，排除“虚拟现实”和“维修”两个题源词，国外学者的研究内容侧重于现代信息化技

术在虚拟维修中的应用研究，与虚拟维修相关的研究热点包括“计算机仿真”、“云计算”、“虚拟机”和“保障性维护”等，见图 3。

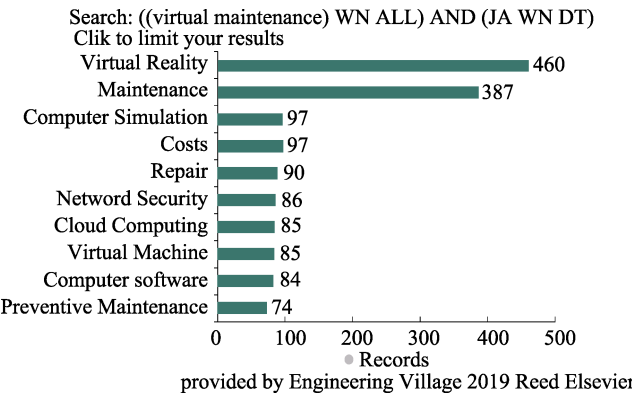


图 3 EI 控制词汇表  
Fig.3 EI controlled vocabulary

CNKI 数据库中检索出中文文献 571 条,从核心库中按时间倒序筛选文献 200 篇进行分析,形成关键词共现网络,见图 4,国内相关研究的重点包括“维修训练”、“训练系统”、“虚拟环境”及“虚拟人”。

从国内发文机构来看,对虚拟维修研究较多的主要是解放军军械工程学院、武汉军械士官学校、中国民航大学等,见图 5。这表面虚拟维修在我国的主要

应用领域是武器装备、航空装备和远洋船舶。国外的研究<sup>[5]</sup>也指出,虚拟维修在以上领域及铁路、工业和建筑方面,研究最为深入。

结合文献分析的结果,装备虚拟维修应用研究主要围绕维修性设计和维修训练两个方面<sup>[6]</sup>。关键技术可以总结为虚拟人、虚拟样机及环境、维修过程与交互及维修性评估技术。

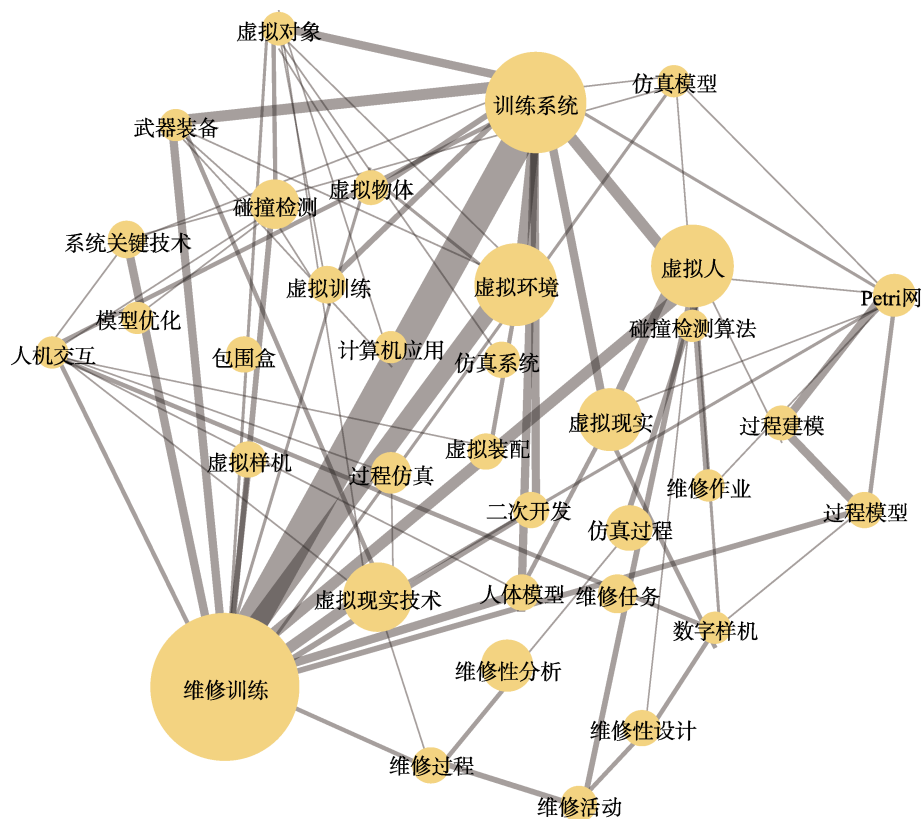


图 4 CNKI 关键词共现网络

Fig.4 Keywords co-occurrence network of CNKI

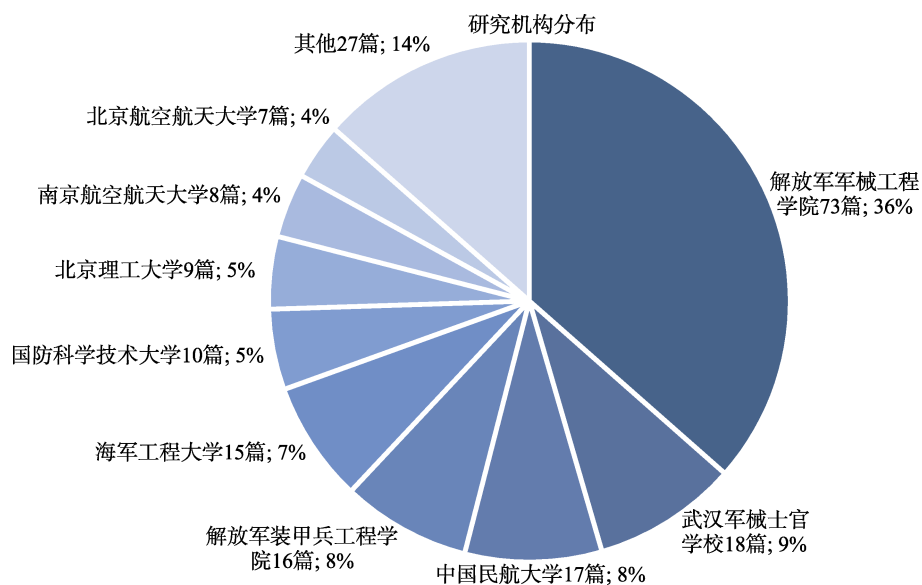


图 5 国内主要发文机构

Fig.5 Main paper publishing institutions in China

## 2 应用现状

### 2.1 维修性设计

维修是指可以将产品恢复到生命周期内的全部功能的操作<sup>[7]</sup>,维修性是产品易于维修的固有特性。杨宇航等人<sup>[8]</sup>将其定义为:在规定条件和时间内按程序进行维修,使其恢复到规定状态的技术能力。应用研究方面,梁伟杰等人<sup>[9]</sup>基于并行工程思想,提出了一种根据虚拟仿真维修的结果数据,制作交互式电子技术手册(IETM)的方法。以某型榴弹炮为例在 Jack 仿真环境中获取分析数据,生产了完备的4级 IETM。张伟等人<sup>[10]</sup>通过调研国外空间站在轨维修情况,指出了维修性设计是延长空间站在轨寿命的关键,提出了基于装备特性的维修需求分析方法,认为空间站维修性设计应包含布局、供电、信息、故障检测、维修工作模式等内容。

重大技术装备的建造是为了长时间使用,一架民机的正常使用年限通常在20~30年之间,维修成本占整个生命周期成本的80%以上<sup>[11]</sup>。为了提升装备的使用寿命,必须在方案设计阶段就对虚拟样机的维修性进行分析和评估,从易维修性的角度发现设计问题,极大地节省研发时间和费用,有利于控制装备整个生命周期的维护成本<sup>[12]</sup>。

### 2.2 维修训练

虚拟样机有很高的复用性,通过虚拟维修对维修人员进行训练,容错率高,能减少人为失误对维修作业的影响<sup>[13]</sup>。早在20世纪90年代,美国NASA就意识到了航天航空装备在维修保障工程上的复杂性和作业人员素质的重要性,在1993年对105名宇航员进行了虚拟维修训练,顺利完成了哈勃望远镜的在轨维修任务,是最早的运用虚拟维修完成实际任务的案例<sup>[14]</sup>。

近年来我国大型装备列装速度迅猛,对专业维修人员的需求极大,开发了多类面向装备维修的虚拟训练系统。季立等人<sup>[15]</sup>通过EON Studio虚拟设计平台,开发了工程车辆虚拟维修训练系统,受训者通过点击、拖动零部件的方式来完成维修与装配。张海峰等人<sup>[16]</sup>基于Open Scene Graph图形库和VC++开发工具,设计了基于虚拟现实技术的动车组检修培训系统,通过将模型与仿真过程树驱动文件分离的方式,实现了模型的可复用性检修拆装仿真。Wang等人<sup>[17]</sup>设计了全功能的变电站仿真维修训练系统,提出了基于纹理切换技术的电力设备状态显示功能,能模拟电力设备的连锁反应状态,被培训人可以模拟演练处理各类型的紧急事故。徐晓刚等人<sup>[18]</sup>指出,单人的虚拟维修训练满足不了实际装备维修的需求,针对舰船维修的工作特点,利用Agent网络通讯机制实现了通信

量和延迟减小,可以满足单人和小团队网络协同维修训练的需要。以上的研究表明,虚拟维修训练尤其适合武器、电力、核动力等高危行业及昂贵设备维修人员的训练,甚至可在新装备列装之前,就培养出一支专业的保障维护队伍。

## 3 关键技术研究现状

### 3.1 虚拟人技术

基于计算机建模与仿真技术,利用虚拟人(Virtual Human)来进行人因仿真,对产品的人机功效进行分析是常用的一种方法<sup>[19]</sup>,可以在虚拟场景中定性地分析人与样机的相互作用关系<sup>[20]</sup>,保证设计方案具备优良的人机使用特性<sup>[21]</sup>。虚拟人应用软件中,德国西门子公司的Jack和法国达索公司的Delmia使用最为广泛。

Jack软件可建立不同比例尺寸和姿态的男女数字模型,可模拟走、爬、捡、放、举等动作,支持通过视野范围分析、碰撞检测、舒适度分析、新陈代谢及疲劳仿真等对方案进行人机校核。方强等人<sup>[22]</sup>用Jack创建了人体关节和骨骼,利用3Ds Max创建了海军虚拟人蒙皮,参考中国人体尺寸90百分位数据,将骨架和蒙皮绑定,虚拟人支持135个自由度的人体关节运动。

Delmia软件的优势在于,能与我国飞机设计制造的主要软件Catia完全兼容,可以直接读取、修改CAD模型<sup>[23]</sup>。Delmia使用了103个测量变量来表示人体模型,提供68个关节来调整模型姿势,内置了常用动作数据库来协助改变人体姿态。支持将数字样机和虚拟人导入仿真环境中,建立任务行为,可实现连续的动作仿真,仿真过程中可进行可视性、可达性、干涉性、能量消耗等分析。刘钊钊等人<sup>[24]</sup>针对Delmia缺少中国人群的弊端,根据人体模型本土化技术,参照《人体尺寸》和Delmia韩国人群文件,开发了人体模型本土化工具。

除了运用软件对人体进行建模,随着传感器技术的发展,软硬件结合建立更为精确的人体模型,也被运用到虚拟人建模中。李澍等人<sup>[25]</sup>应用ART全身动作捕捉设备,将人体骨架和关节角度信息映射到Catia软件的人体模型中,可结合5DT工业级虚拟头盔显示器,对人体模型进行驱动。方雄兵等人<sup>[26]</sup>认为,快速、逼真地让虚拟人模拟真实维修人员完成指定的维修任务和动作,是仿真工作中的难点,提议开发基于动捕数据的虚拟人动作库和姿态库,演示了Jack中转换BVH动捕数据的案例。

### 3.2 虚拟样机及环境技术

虚拟维修样机(Virtual Maintenance Prototype)、虚拟工具(Virtual Tools)和虚拟环境(Virtual En-

vironment)是面向装备维修性分析和设计的实际场景的计算机虚拟仿真模型<sup>[27]</sup>。

虚拟维修样机主要是对装备的 CAD 数据进行转换处理、装配关系重构和维修特征定义<sup>[22]</sup>。主要模型生成工具有 Pro/E、Catia、Solidworks 等工程软件,环境生成工具有 3DS Max、Sketch-up 等<sup>[16,28]</sup>。杨壹斌等人<sup>[29]</sup>采用 3DS Max 和 Solidworks 对装备样机、维修工具及场景模型进行了建模,利用 Unity3D 构建了操作界面和交互控制场景。康兴汝等人<sup>[30]</sup>利用 Multigen Creator 和 3DS Max 创建了汽轮机零件、维修工具及维修车间模型,分析了纹理、材质、光照等技术,提高了虚拟维修的真实感。

几何样机的 CAD 精细模型通过大量的多边形表达,模型量大,不利于场景渲染,在建立虚拟样机时应尽量减少模型多边形的数量。米小珍等人<sup>[31]</sup>面对高度列车转向架这类大型复杂结构,运用 AABB 包围盒的图形加速技术 LOD (Level of Detail),实现了维修场景中的模型简化,通过建立剖面 and 双中心投影的原理,实现了复杂模型的简化立体显示。

### 3.3 维修过程与交互技术

维修过程是一个动态的、多阶段的事件序列,始于装备的故障评估,止于装备回到正常状态。而虚拟维修过程是通过虚拟样机约束状态及维修任务来驱动虚拟人的运动行为的事件。目前虚拟人的行为控制方法主要有关键帧法<sup>[32]</sup>、运动学法<sup>[33]</sup>、动力学法<sup>[34]</sup>、运动捕捉法等<sup>[35]</sup>。

为使生成的虚拟人动作连贯、自然、流畅,文献<sup>[27]</sup>利用 Jack 的 Python 语言脚本描述交互行为,通过组织这些交互脚本可以建立任务的维修行为过程,运行脚本即可实现虚拟维修仿真。耿宏等人<sup>[32]</sup>分析了机务维修中手部的操作特征,归纳了漫游、抓取和指间类动作,使用骨骼动画引擎 Cal3D 和 osgCal 类库,来驱动虚拟手操作仿真,能够通过键鼠操作完成维修任务。Slonneger 等人<sup>[36]</sup>基于 Jack 开发了人体建模软件测试平台(HMST),能实现避免碰撞干涉的智能到达、抓取、观察等行为。杨庆等人<sup>[37]</sup>提出了一种面向装配操作动作提取的交互装配操作仿真与动作提取方案,重点解决了虚拟模型对运动捕捉下真人动作要素的识别问题。朱洪敏等人<sup>[38]</sup>则对拧紧、敲击类交互驱动方式进行了详细描述。

从以上的研究可以看出,虚拟人手部行为是虚拟人与维修作业交流的桥梁。在复杂装备中,手部关节要与成千上百个不同工具及零部件产生交互,精细度和复杂度很高,现有的手工驱动、模型驱动和数据驱动方式,效果并不理想<sup>[39]</sup>。研究智能动作规划技术十分重要。

### 3.4 维修性评估技术

维修性评估是基于虚拟维修技术发现装备的维

修性问题,评估装备的维修性水平<sup>[40]</sup>。开展装备的维修性评估,是虚拟维修研究的一项核心目的,评估内容包括围绕人机工效展开的可达性分析、可视性分析、碰撞干涉分析、作业姿态的舒适性评估以及维修性的综合评判。评估流程通常涵盖指标选取、计算权重、建立模型几个步骤。不同的装备其评价对象、指标体系有所不同,但赋权方法和评价模型有共通之处。常用的评价方法有层次分析法、模糊综合评判法、灰色综合评价法、理想点法等。

在实际应用方面,文献<sup>[41]</sup>提出了一种维修工具使用时的可达域计算及三维可视化方法,结合 Jack 仿真软件, Tcl/Tk 以及 Python 语言,实现了可达性的分析功能。夏坚等人<sup>[42]</sup>分析了可视性、可达性和操作空间分析的判断方法,定义了评价等级,在 Delmia 中进行了维修飞机机翼盒段的可视验证。维修性综合评判研究方面,Slavila 等人<sup>[43]</sup>将标准化、模块化和易拆卸性作为指标,提供了一种装备方案设计过程中的可维修性模糊评价方法。Lu 等人<sup>[44]</sup>用理想点法评估了民机的可维修性,通过两款飞机的起落架系统验证了模型的有效性。文献<sup>[24]</sup>基于层次分析法建立了航空维修的人因、零部件和时间指标体系与模糊综合评判模型,在虚拟维修系统中以某型直升机放油维护为例,进行了验证。

上述研究表明,维修性分析和校核方法被广泛集成到虚拟维修系统中,但指标选取较为固定,指标体系为单一层级,虽然通用性强,但是只能得出整体性评价,不利于对复杂系统维修性的精确度量。

## 4 研究展望

虚拟维修经过将近三十年的发展,被证实为可靠的改善装备维修性和节省研发成本的方法,设计对应的虚拟维修系统也逐渐成为重大技术装备研发的必然举措,针对应用和技术研究现状,结合国内信息化发展的良好态势,虚拟维修还可以在以下几个方面开展研究。

### 4.1 基于传感器技术的沉浸式交互方式

目前的运动捕捉系统已经能轻松捕获并建立人体模型与动画。运用沉浸式 I/O 设备,如 VR 头盔、手柄、手套等已经能还原现实场景画面,使虚拟人机的几何交互关系完全真实化。进一步可依托生理传感器技术采集力量、能量消耗、注意力等数据,在维修场景中进行反馈,并编入维修性评估体系。

### 4.2 核心软件技术的完善

我国的虚拟维修系统大多是在 Jack、Delmia 软件上进行的二次开发,费用较贵,虚拟人体模型也缺乏中国人群数据,模型导入也存在优化及信息转换的

问题, 需要多种工具协同并开发或购买相应的接口。但最优的解决方法是研制有自主知识产权的虚拟维修软件平台。

### 4.3 多人协同维修与团体评估方法

现阶段的虚拟维修仿真以单个维修人员完成维修任务为目的, 随着装备的复杂化、对维修效率要求的提高, 多人协作完成维修任务已经成为一种常态, 单人虚拟维修仿真已经不能胜任作业需求。开发能满足多人协同维修的虚拟维修系统, 并将团队绩效评估体系纳入到维修性评估中, 是具有实际意义的研究方向。

## 5 结语

国家对重大技术装备研发的重视和在信息化发展中取得的成果, 为虚拟维修研究迎来了新的契机, 虚拟维修已经在我国多个领域得到了实际运用, 有效地提高了经济和社会效益。通过对目前虚拟维修应用现状及关键技术研究现状的综述, 提出了可进一步研究的三个方向, 期望为我国相关技术的独立研发提供参考。

### 参考文献:

- [1] 郝建平. 虚拟维修仿真理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
HAO Jian-ping. Virtual Maintenance Simulation Theory and Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [2] MIL-HDBK-470, A Designing and Developing Maintainable Products and Systems[S].
- [3] ARENDARSKI B, TERMATH W, MECKING P. Maintenance of Complex Machines in Electric Power Systems Using Virtual Reality Techniques[C]. USA: IEEE International Symposium on Electronic Insulation, 2008.
- [4] 周栋, 霍琳, 王美慧, 等. 虚拟维修技术研究与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 231-236.  
ZHOU Dong, HUO Lin, WANG Mei-hui, et al. Research and Application of Virtual Maintenance Technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 231-236.
- [5] DINI G, MURA M D. Application of Augmented Reality Techniques in Through-life Engineering Services[J]. Procedia CIRP, 2015, 38: 14-23.
- [6] 马麟, 吕川. 虚拟维修技术的探讨[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005(12): 2729-2733.  
MA Lin, LYU Chuan. Study on Virtual Maintenance Technology[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005(12): 2729-2733.
- [7] KOMONEN K. A Cost Model of Industrial Maintenance for Profitability Analysis and Benchmarking[J]. International Journal of Production Economics, 2002, 79(1): 15-31.
- [8] 杨宇航, 李志忠, 郑力. 虚拟维修研究综述[J]. 系统仿真学报, 2005(9): 2191-2195.  
YANG Yu-hang, LI Zhi-zhong, ZHENG Li. Survey of Virtual Maintenance[J]. Journal of System Simulation, 2005(9): 2191-2195.
- [9] 梁伟杰, 常雷, 李星新, 等. 一种基于虚拟维修仿真的交互式电子技术手册生成方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6854-6857.  
LIANG Wei-jie, CHANG Lei, LI Xing-xin, et al. Approach of Interactive Electronic Technical Manual Generation Based on Virtual Maintenance Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(24): 6854-6857.
- [10] 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.  
ZHANG Wei, XIA Qiao-li. Study on Design and Verification Method of Space Station Maintainability[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(2): 134-138.
- [11] CAO Z. Cost Management of Airlines[J]. Technology and Economics of Civil Aviation, 2000, 19(1): 14-20.
- [12] 杨徐晗, 徐国标. 虚拟维修技术在民航中的应用初探[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(5): 159-163.  
YANG Xu-han, XU Guo-biao. First Discussion about Virtual Maintenance Technology Application in Civil Aviation[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(5): 159-163.
- [13] CRESCENZIO F, FANTINI M, PERSIANI F, et al. Augmented Reality for Aircraft Maintenance Training and Operations Support[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, 31(1): 96-101.
- [14] FLAM F. NASA Stakes Its Reputation on Fix for Hubble Telescope[J]. Science, 1993, 259(7): 887-889.
- [15] 季立, 王海涛, 赵鸿飞, 等. 交互式工程车辆虚拟维修训练系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 231-233.  
JI Li, WANG Hai-tao, ZHAO Hong-fei, et al. The Design of the Virtual Maintenance Training System for the Interactive Engineering Vehicles[J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(2): 231-233.
- [16] 张海峰, 周韶泽, 崔凯, 等. 基于VR技术的标准动车组虚拟检修系统设计[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(2): 43-47.  
ZHANG Hai-feng, ZHOU Shao-ze, CUI Kai, et al. Res-

- earch and Implementation of a Virtual Maintenance System for CEMU Based on VR Technology[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(2): 43-47.
- [17] WANG W, LI G. Virtual Reality in the Substation Training Simulator[C]. USA: International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, 2010.
- [18] 徐晓刚, 欧立铭, 邵承永. 单人/多人虚拟维修训练开发平台[J]. 兵工学报, 2012, 33(7): 886-891.
- XU Xiao-gang, OU Li-ming, SHAO Cheng-yong. The Exploitation Flat for Virtual Maintenance Training by Multi-users and Single User[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(7): 886-891.
- [19] GOULD D A, CHALMERS N, JOHNSON S J, et al. Simulation: Moving from Technology Challenge to Human Factors Success[J]. Cardiovascular & Interventional Radiology, 2012, 35(3): 445-453.
- [20] 王宏伟, 周前祥. 虚拟人体系统建模应用综述[C]. 无锡: 2007 年中国控制与决策学术年会, 2007.
- WANG Hong-wei, ZHOU Qian-xiang. Overview of Application of Virtual Human System Modeling[C]. Wuxi: Proceedings of the 2007 Chinese Annual Conference on Control and Decision Making, 2007.
- [21] 周前祥, 王春慧. 虚拟人体建模技术及其在载人航天中的应用[J]. 中国航天, 2004(12): 37-38.
- ZHOU Qian-xiang, WANG Chun-hui. Virtual Human Body Modeling and Its Application in Manned Space-flight[J]. Aerospace China, 2004(12): 37-38.
- [22] 方强, 王松山, 祝泓, 等. 基于数字样机的舰船维修性设计分析技术[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 114-120.
- FANG Qiang, WANG Song-shan, ZHU Hong, et al. Ship Maintainability Design Analysis Technology Based on Digital Prototyping[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 114-120.
- [23] 秦洪亮, 王金利, 韩斌. 飞机虚拟维修三维人体建模技术综述[J]. 航空科学技术, 2015, 26(12): 1-5.
- QIN Hong-liang, WANG Jin-li, HAN Bin. A Survey of Human Model Reconstruction Technology for Aircraft Virtual Maintenance[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(12): 1-5.
- [24] 刘钊钊, 田凌, 杨宇航. 航空虚拟维修系统关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 47-57.
- LIU Bei-bei, TIAN Ling, YANG Yu-hang. Key Technologies for Aviation Virtual Maintenance System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 47-57.
- [25] 李澍, 郭逸婧, 程大林, 等. 一种应用于产品装配/维修仿真的虚拟交互方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(S1): 59-66.
- LI Shu, GUO Yi-jing, CHENG Da-lin, et al. A Virtual Interactive Method for Virtual Assembly and Maintenance Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(S1): 59-66.
- [26] 方雄兵, 陈颖, 李涛涛, 等. 舰船虚拟维修仿真应用系统的设计与实现[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(6): 136-144.
- FANG Xiong-bing, CHEN Ying, LI Tao-tao, et al. Design and Implementation of the Ship Virtual Maintenance Simulation Application System[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(6): 136-144.
- [27] 王松山, 郝建平. 虚拟维修样机系统及建模技术[J]. 系统仿真学报, 2005(5): 1132-1136.
- WANG Song-shan, HAO Jian-ping. System of Virtual Maintenance Prototype and Modeling Technology[J]. Journal of System Simulation, 2005(5): 1132-1136.
- [28] 邹俊俊, 冯岩, 潘磊, 等. 面向检修过程的一种铁路客车转向架虚拟检修系统开发[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(3): 57-59.
- ZOU Jun-jun, FENG Yan, PAN Lei, et al. Development of Virtual Maintenance System for Bogie of Railway Passenger Train[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(3): 57-59.
- [29] 杨壹斌, 李敏, 解鸿文. 基于 Unity3D 的桌面式虚拟维修训练系统[J]. 计算机应用, 2016, 36(S2): 125-128.
- YANG Yi-bin, LI Min, XIE Hong-wen. Desktop Virtual Maintenance Training System Based on Unity3D[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(S2): 125-128.
- [30] 康兴汝. 基于虚拟现实技术的电厂汽轮机设备维修模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- KANG Xing-ru. Research on the Simulation of Power Plant Turbine Equipment Maintenance Based on Virtual Reality Technology[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
- [31] 米小珍, 刘光亮, 周韶泽. 动车组转向架虚拟装配系统可视化技术[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(6): 58-62.
- MI Xiao-zhen, LIU Guang-liang, ZHOU Shao-ze. Research and Application on Visualization Technology of Virtual Assembly System for EMU Bogies[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2011, 32(6): 58-62.
- [32] 耿宏, 文飞. 面向机务虚拟维修训练的虚拟手操作设计[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(7): 1279-1284.
- GENG Hong, WEN Fei. Design of Virtual Hand Operation for Virtual Engineering Maintenance Training[J].

- Computer Engineering and Science, 2019, 41(7): 1279-1284.
- [33] 姜艳秋, 叶瑰昀, 杨爱军. 基于BP神经网络虚拟人运动控制方法的研究与实现[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2015(5): 12-14.
- JIANG Yan-qiu, YE Gui-yun, YANG Ai-jun. Based on BP Neural Network is the Research and Implementation of Virtual Human Motion Control Method[J]. Journal of Qiqihar University(Natural Science Edition), 2015(5): 12-14.
- [34] 蒋科艺, 李本威, 王永华, 等. 虚拟维修中的虚拟人移动仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2373-2378.
- JIANG Ke-yi, LI Ben-wei, WANG Yong-hua, et al. Virtual Human Locomotion Simulation for Virtual Maintenance[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(10): 2373-2378.
- [35] 梁丰, 张志利, 李向阳, 等. 基于光学运动捕捉数据的虚拟人下肢运动控制方法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 327-335.
- LIANG Feng, ZHANG Zhi-li, LI Xiang-yang, et al. Research on Motion Control Technology of Virtual Human's Lower Limb Based on Optical Motion Capture Data[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 327-335.
- [36] SLONNEGER D, CROOP M, CYTRYN J, et al. Human Model Reaching, Grasping, Looking and Sitting Using Smart Objects[C]. International Ergonomic Association-Digital Human Modeling, 2011.
- [37] 杨庆, 韦志辉, 吴泽彬, 等. 虚拟环境中面向操作工艺规划的装配建模[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(4): 377-381.
- YANG Qing, WEI Zhi-hui, WU Ze-bin, et al. Assembly Modeling for Operation Process Planning in Virtual Reality Environment[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 14(4): 377-381.
- [38] 朱洪敏, 武殿梁, 甄希金, 等. 面向交互操作的虚拟工具建模与操作技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 57-63.
- ZHU Hong-min, WU Dian-liang, ZHEN Xi-jin, et al. Tools Modeling and Operation Method for Interactive Operation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 57-63.
- [39] 刘钊钊, 田凌, 杨宇航, 等. 基于知识的航空虚拟维修技术[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 127-146.
- LIU Bei-bei, TIAN Ling, YANG Yu-hang, et al. Knowledge-based Virtual Aviation Maintenance Technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6): 127-146.
- [40] PENG G, HOU X, GAO J, et al. A Visualization System for Integrating Maintainability Design and Evaluation at Product Design Stage[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1-4): 269-284.
- [41] 方雄兵, 田正东, 林锐, 等. 维修工具使用的可达域计算及可视化方法[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(5): 14-18.
- FANG Xiong-bing, TIAN Zheng-dong, LIN Rui, et al. A Method for Accessible Domains Computation and Visualization in the Case of Using Maintenance Tools[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(5): 14-18.
- [42] 夏坚. 民用飞机虚拟维修可达性技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(1): 65-68.
- XIA Jian. Research on the Virtual Maintenance Simulation Reachability Technology of Civil Aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2017(1): 65-68.
- [43] SLAVILA C A, DECREUSE C, FERNEY M. Fuzzy Approach for Maintainability Evaluation in the Design Process[J]. Concurrent Engineering Research & Applications, 2005, 13(4): 291-300.
- [44] LU Z, SUN Y C. Maintainability Virtual Evaluation Method Based on Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Theory for Civil Aircraft System[C]. Reliability: Maintainability and Safety, 2009.