

大型复杂装备协同式 虚拟维修训练技术

李向阳 张志利 王蕊 梁丰 著



科学出版社

大型复杂装备协同式虚拟 维修训练技术

李向阳 张志利 王蕊 梁丰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书研究了协同式虚拟维修训练系统及其仿真支撑平台的总体框架设计,设计了协同式维修任务过程模型、任务分配与决策方法,建立了面向维修对象的协同式虚拟维修操作过程模型,设计了基于装配体拆卸/装配矩阵的协同式拆卸/装配操作过程控制算法,研究了其中的人机交互特征建模,建立了协同式人机交互控制模型,研究了异构数据信息转换、描述和处理,以及并发冲突控制和数据一致性实现方法。

本书可作为高等学校计算机工程、仿真技术、电子信息、维修与维修性工程等相关专业本科生和研究生的教材,也可供工程技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型复杂装备协同式虚拟维修训练技术/李向阳等著. —北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-052197-2

I. 大… II. 李… III. 武器装备-维修 IV. E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 056737 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2017年5月第一版 开本:720×1000 B5

2017年5月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:278 000

定价:90.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

协同式维修是指在大型复杂装备维修过程中多个维修人员在技术部门和保障单位的协同配合下,按照装备中故障部件的维修工艺、技术规范和操作步骤所实施的维修活动,具有协同性、一致性和交互性的特征和需求。随着自动化程度密集、智能化水平高的新一代大型复杂武器装备服役部队,其结构组成复杂、集成度高,使得维修难度大、操作过程复杂,通常需要多个技术部门和维修人员的协同配合才能顺利完成相应的维修任务。目前,部队缺乏相应的维修训练技术手段和保障资源,使得维修人员的训练和培养严重滞后。随着数字样机(DMU)和虚拟现实(VR)等技术的飞速发展,虚拟维修(VM)为复杂产品的维修训练和维修性分析与设计提供了重要的技术支撑。但是,采用传统的 VM 技术开展大型复杂装备的维修技能训练,由于未考虑多个维修人员之间的任务分工、协同操作和数据一致性问题,其中的维修过程建模、操作行为描述和信息通信处理都较为简单,无法真实反映复杂装备的真实维修过程,也不能满足大型复杂装备维修训练的现实需求。

随着大型复杂装备维修训练及其保障需求的日益增加,协同式虚拟维修(CVM)技术便应运而生。CVM 技术将 VM 技术与计算机支持的协同工作(CSCW)相结合,通过开发具有较好沉浸感、交互性和可感知性的 CVM 训练环境(CVMTE),为维修技术部门和操作人员提供一个获取维修知识和操作技能的训练平台,在实现多个维修人员共享维修资源和数据信息的同时,能够实现多人之间的协同工作和配合操作,从而为多个维修人员协同进行复杂装备的维修训练提供支撑技术和实现途径,为其维修性分析、保障资源优化、维修方案设计和人因工程分析提供技术手段。

目前,国内外学者开展的相关研究工作集中于利用桌面式或者半沉浸式 VR 技术,针对不同应用领域的 VM 训练系统(VMTS)进行应

用开发研究,探索对单个维修人员进行操作训练的新技术和新方法。而对于组建 CVM 训练系统(CVMTS)进行大型、巨型武器装备多人合作维修操作训练的技术研究尚处于探索阶段,相关的课题研究和论文发表也较少。此外,由于沉浸式 CVMTE 构建时所需的设备较为复杂,成本较为昂贵,技术交叉程度高,使得相应的 CVM 训练(CVMT)技术研究和应用开发也受到了一定的限制。从当前国内对 CVMT 技术进行的相关研究来看,缺乏一个能够支持不同技术领域且具有较好通用性的仿真支撑平台(SSP),为此针对多个操作人员进行大型复杂装备协同式维修训练的具体需求,需要探索如何组建具有较好稳定性、通用性、扩展性、实时性和沉浸感的 CVMTE,研究多个维修人员的动态任务分配、操作过程建模、人机交互控制、协同配合机制,以及数据信息共享、交互通信和冲突控制机制等基础技术,开发出能够满足不同应用需求的 CVMTS 及其 SSP,是今后 VM 技术的重要发展方向之一,也是迫切需要解决的实际问题和关键技术所在。

鉴于目前国内尚无此类较为系统全面地论述大型复杂装备 CVMT 技术与方法方面的专著,面向学科和领域前沿,并结合科研实际,作者将近 10 年来的研究成果撰写成本书,希望可以抛砖引玉。全书分为 7 章。第 1 章主要介绍 CVMT 的相关技术及其研究现状,给出全书的撰写思路与结构安排。第 2 章分析大型复杂装备 CVMTS 的具体功能需求,对应用系统及其成员进行总体框架和功能结构设计,研究了大型复杂装备 CVMTS 及其 SSP 的实现方法。第 3 章分析 CVMTS 中维修任务过程的建模特点,研究基于 Petri 网的协同式维修任务过程建模及其动态分配策略。第 4 章着重分析 CVMTS 中维修操作过程的协同模式及其建模特点,研究基于时间颜色 Petri 网的 CVM 操作过程描述方法,以及 CVM 操作过程的仿真算法。第 5 章研究虚拟人体运动仿真技术,尤其是多个虚拟维修人员的协同交互控制方法与技术,建立了协同式人机交互控制模型。第 6 章主要针对 CVMTS 中异构数据信息的交互通信与协同处理需求,研究了异构数据信息的分发管理、并发冲突控制、仿真时间管理及数据一致性实现等方面的方法与技术。第 7 章论述基于沉浸式 VME 进行大型复杂装备 CVMTS 开发的相关技术和实

现途径,并结合仿真实例验证了 CVMTS 及其 SSP 框架结构的通用性和可扩展性,以及各项技术的正确性和先进性。

本书的出版得到火箭军工程大学各级领导和许多专家的支持与帮助。本书的出版得到了军队“2110 工程”三期建设的大力资助。此外,科学出版社魏英杰也付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢!

中国工程院院士、火箭军工程大学黄先祥教授对本书的出版给予了热情帮助和悉心指导,并亲自对初稿进行审阅,提出了诸多宝贵的修改建议。黄院士严谨认真的工作态度和奖掖后学的关爱精神,令我们感动不已,在此表示衷心感谢!

限于水平,不妥之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

李向阳

2016 年 9 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 技术背景与研究意义	1
1.2 CVMT 的相关技术研究现状	3
1.2.1 VMT 技术	3
1.2.2 CSCW 技术	8
1.2.3 协同任务及协同过程建模技术	9
1.2.4 协同式虚拟环境数据信息一致性技术	10
1.2.5 CVM 并发冲突控制技术	12
1.2.6 虚拟人体运动仿真及实时交互控制技术	13
1.3 全书主要思路和工作	14
1.4 全书内容结构安排	17
第 2 章 大型复杂装备 CVMTS 及其 SSP 开发	19
2.1 引言	19
2.2 大型复杂装备 CVMTS 功能需求分析	20
2.2.1 大型复杂装备维修类型	20
2.2.2 大型复杂装备维修特点	23
2.2.3 大型复杂装备 CVMT 需求分析	25
2.2.4 大型复杂装备 CVMTS 功能设计	29
2.3 基于 HLA 和 MAS 的大型复杂装备 CVMTS 总体设计	31
2.3.1 大型复杂装备 CVMTS 设计方法分析	31
2.3.2 基于 HLA 和 MAS 的大型复杂装备 CVMTS 设计方法	36
2.3.3 大型复杂装备 CVMTS 及其 SSP 框架结构	39
2.4 大型复杂装备 CVMTS 联邦成员功能结构设计	42
2.4.1 仿真运行管理联邦成员	42

2.4.2 协同维修仿真模型联邦成员	45
2.4.3 维修人员操作训练联邦成员	47
2.4.4 沉浸式 VME 联邦成员	49
2.5 大型复杂装备 CVMTS 及其 SSP 实现方法研究	51
2.5.1 支持服务层	51
2.5.2 对象知识层	54
2.5.3 仿真应用层	55
2.5.4 用户界面层	55
2.6 小结	56
第 3 章 CVMT 中维修任务过程建模及其动态分配策略	57
3.1 引言	57
3.2 CVMTS 中维修任务过程建模分析	58
3.2.1 维修任务过程建模相关概念及定义	58
3.2.2 协同式维修任务过程建模特点	59
3.2.3 协同式维修任务过程层次化建模	61
3.3 基于 Petri 网的协同式维修任务过程建模分析	63
3.3.1 基于 Petri 网的协同式维修任务过程建模技术	63
3.3.2 基于层次化 Petri 网的逻辑结构建模	65
3.3.3 面向维修人员的逻辑关系建模	66
3.3.4 协同式维修任务过程模型的状态演化分析	70
3.4 协同式维修任务过程建模及其动态分配策略研究	73
3.4.1 基于 HCPN 的协同式维修任务过程模型	74
3.4.2 基于 CMTSPS_HCPN 的维修任务过程建模规则	76
3.4.3 基于 CMTSPS_HCPN 的维修任务过程建模	78
3.4.4 协同式维修任务动态分配决策	83
3.5 小结	87
第 4 章 CVMTS 维修操作过程建模与仿真研究	88
4.1 引言	88
4.2 CVMTS 维修操作过程建模分析	89
4.2.1 协同式维修操作过程特点	89

4.2.2 CVM 操作过程模式分析	90
4.3 基于时间 CPN 的 CVM 操作过程描述	91
4.3.1 维修对象	92
4.3.2 维修人员	92
4.3.3 维修资源	94
4.3.4 CVM 操作过程	95
4.4 CVM 操作过程建模与仿真实现	98
4.4.1 协同式维修操作模型	98
4.4.2 面向装配体的拆卸/装配模型	100
4.4.3 CVM 操作过程模型	102
4.4.4 CVM 拆卸操作过程仿真算法实现	105
4.4.5 CVM 装配操作过程仿真算法实现	108
4.5 小结	111
第 5 章 虚拟人体运动仿真及其协同式交互控制	113
5.1 引言	113
5.2 CVMTS 中的虚拟人体建模技术	113
5.2.1 虚拟人体骨架模型	114
5.2.2 虚拟人体皮肤建模技术	116
5.2.3 虚拟人体皮肤变形方法	119
5.3 虚拟人体运动仿真模型	120
5.3.1 虚拟人体骨架运动坐标系	121
5.3.2 四元数旋转及插值	124
5.3.3 虚拟人体骨架运动模型	127
5.3.4 虚拟人体皮肤变形实现	130
5.4 多个虚拟维修人员的协同交互控制技术	133
5.4.1 CVM 中的人机交互控制技术	133
5.4.2 被动式光学运动捕捉技术	136
5.4.3 多人运动捕捉数据的信息补偿方法	139
5.4.4 CVM 中人机交互特征建模	143
5.4.5 协同式人机交互控制模型	147

5.5 小结	150
第6章 CVMTS 中异构数据信息的交互通信与协同处理	151
6.1 引言	151
6.2 CVMTS 中异构数据信息的分发管理	152
6.2.1 CVMTS 中异构数据信息描述需求分析	152
6.2.2 基于 XML 的异构数据信息描述	153
6.2.3 CVMTS 中的 DDM 优化方案	157
6.3 CVMTS 中的并发冲突控制策略	160
6.3.1 CVMTS 中的并发冲突类型	160
6.3.2 基于 HLA 所有权管理的并发冲突控制	161
6.4 CVMTS 仿真时间管理及数据一致性实现	164
6.4.1 CVMTS 仿真时间管理机制	165
6.4.2 CVMTS 中数据一致性实现	168
6.5 小结	171
第7章 基于沉浸式 VME 的大型复杂装备 CVMTS	172
7.1 引言	172
7.2 沉浸式 CVMTS 的组建与开发平台	172
7.2.1 沉浸式 CVMTS 的硬件开发平台	173
7.2.2 沉浸式 CVMTS 的软件开发平台	176
7.3 沉浸式 VME 的关键技术研究及实现	177
7.3.1 基于光学式动作捕捉系统的虚拟人体实时运动控制	177
7.3.2 数据手套对虚拟人体手部动作的实时控制	182
7.3.3 被动式立体投影技术	183
7.4 大型复杂装备 CVMTS 仿真实例	185
7.5 小结	189
第8章 总结与展望	191
8.1 总结	191
8.2 展望	193
参考文献	195

第 1 章 绪 论

1.1 技术背景与研究意义

维修的本质是指使产品保持或恢复到规定技术状态所进行的全部活动^[1,2],典型的维修包括准备、诊断(故障检测和定位)、更换(拆卸和装配)、调整和校准、保养、检验,以及原件修复 7 个步骤。导弹发射车、军用飞机、军舰和航空母舰等大型复杂装备,是集机械、液压、电子、光学、计算机、自动控制等技术于一体的复杂系统。其组成零部件数以万计,总体结构极其复杂、集成度较高,自动化、信息化和智能化水平日趋增加,使得大型复杂装备的维修难度大、操作过程复杂,常需要多个技术部门,以及维修人员的协同配合才能顺利完成相应的维修任务^[3]。针对大型复杂装备的维修特点和训练任务需求,不但需要考虑装备各零部件的维修工艺、技术规范和操作步骤,而且需要考虑不同工位上维修人员的维修任务规划与合理分配,以及维修操作过程中多个维修人员相互之间的协同配合。

然而,当前大型复杂装备的维修教学和训练主要依赖于实际装备。由于受到实装数量和训练场地的限制,受训人员数量及其训练时间难以保证,训练效率低下、成本较高^[4]。同时,结合实装进行维修训练,操作模式和训练内容极其有限,受训人员对于零部件故障现象及其维修操作的理解与体会较为抽象,不能直接获取真实有效的维修知识与操作技能。尤其对于新型复杂武器装备,在装备到位之前无法开展相应的维修训练。考虑到新型武器装备造价昂贵、系统组成复杂和战备的完好性需求,其配备部队后也不可能被用于维修训练,从而导致相应的

维修技术人员极其缺乏。当武器装备在野外实装演练和作战过程中出现故障时,需要返厂进行故障检测和维修,时间周期长,效率低下,且成本较高,战时还会贻误战机或者造成装备受毁,严重制约了大型武器装备的实战生存和作战能力。这是当前国际军事信息化建设飞速发展的情况下迫切需要解决的技术难题。

与传统的维修训练手段相比,虚拟维修训练(virtual maintenance training, VMT)技术具有较好的通用性、可重用性和资源共享性,便于系统维护和扩展,降低了开发成本、缩短了开发周期,为国防工业和军事领域复杂装备的日常维护和故障维修训练提供了经济有效的解决途径。但是,现有的研究成果和应用系统^[4-16]主要是针对单个维修人员的操作训练需求,对基于非沉浸式或桌面式虚拟现实(virtual reality, VR)技术开发单机维修训练系统涉及的各项技术进行研究和探索,没有考虑多个维修人员之间的相互配合和协同操作等问题,不能够真实地展示大型复杂装备实际维修操作过程的本质实现。

协同式虚拟维修(collaborative VM, CVM)技术正是为了解决大型复杂装备真实维修训练的迫切需求,在将 VM 技术与计算机支持的协同工作(computer supported cooperative work, CSCW)技术相结合的基础上逐步发展起来的。CVM 在实现多个维修人员共享维修资源和数据信息的同时,还能实现其相互之间的协同感知和配合操作,从而为多个维修人员协同进行大型复杂装备的维修操作训练提供支撑技术,并对其维修性分析、维修方案优化设计和人因工程分析提供技术手段。然而,CVM 技术涉及的理论知识和技术领域较为广泛和复杂,相应的训练系统开发难度较大,因此这方面的研究不多。

近年来,一些学者尝试用复杂系统建模方法和分布式仿真技术对协同式维修过程进行建模和仿真,取得了一定的效果^[17-20]。目前,国内外的研究主要集中于大型复杂装备的协同设计、维修性分析与设计、人因工程分析等应用领域,对于 CVM 及其训练模式只是进行了初步的技

术研究。对于通过开发具有较好通用性和可扩展性的仿真平台,组建具有较好沉浸感的虚拟环境(包括立体投影系统、人体运动捕捉系统、空间位置跟踪装置、数据手套等 VR 设备和 VR 仿真平台)开展 CVM 训练(CVM training, CVMT),很少见到相关的报道和文献。本书从大型复杂装备的维修任务需求、维修操作规程和协同配合机制入手,初步探讨了多个维修人员 CVMT 中的各项关键技术。本书的研究对于培养维修人员真实的协同维修操作技能,进而及时恢复和保持大型武器装备的作战能力,确保作战部队在信息化战争条件下的作战和生存能力,都具有重要的军事意义和良好的经济效益。

1.2 CVMT 的相关技术研究现状

1.2.1 VMT 技术

VM 是实际维修过程在计算机上的本质实现^[12],作为一门新兴的先进仿真技术,源于汽车、飞机、船舶等复杂系统研制中对维修性工作的迫切需求^[15]。VM 以计算机技术、信息技术、仿真技术和 VR 技术为依托,在由计算机创建的,包含产品 VM 样机和维修人员三维人体模型,以及底层驱动数学模型的虚拟环境中,采用维修人员在回路或者驱动人体模型的方式,通过协同工作模式和人机交互控制对整个维修过程进行仿真,实现产品维修性的分析与设计、维修过程的规划与验证、维修操作训练与维修支持、各级维修机构的管理与控制等产品维修的本质过程,以增强产品寿命周期各阶段、产品全系统各层次的辅助分析和决策控制能力^[11]。

由此可见,VM 在宏观上属于仿真范畴,同时又强调具有 VR 系统的三个特征,即沉浸性、交互性和自主性^[12]。VM 主要有交互式 VM 和沉浸式 VM 两种实现方式,如表 1.1 所示。前者采用虚拟操作人员修理虚拟产品的方式,完全通过人体模型的控制算法来驱动对象模型完

成维修操作仿真。后者采用真实操作人员修理虚拟产品的应用模式，通过 VR 交互外设来控制人体模型动作，实现了“人在回路”的维修操作仿真。

表 1.1 交互式 VM 和沉浸式 VM 技术对比

项目	交互式 VM	沉浸式 VM
最终目标	设计、分析、验证、评估、优化产品维修过程提高产品维修性,提高产品维修性	设计、分析、验证、评估、优化产品维修过程提高产品维修性,提高产品维修性和保障性
任务	维修过程设计验证;维修性分析、验证与评估	维修过程设计验证;维修性设计、分析、验证与评估
技术任务	维修仿真模型建模;维修任务和过程规划;维修过程演示;维修性分析评价	维修仿真模型建模;维修任务和过程规划;维修过程演示;维修性分析评价
应用领域	维修过程分析;维修性定性/定量分析;维修保障分析;人机工程;维修训练	维修过程设计、分析;维修性定性/定量分析;维修保障分析;人机工程;维修训练
使用虚拟设备	否	是
使用虚拟环境	不一定	是
预先设定条件	需设定维修任务、拆装顺序和拆装路径	是
所需虚拟资源	无要求	维修车间设备;外场维修设备;维修工具

如同真实维修过程一样,VMT 技术研究同样需要考虑维修对象、维修人员、维修资源(维修工具、测试设备、维修设备、保障设施、备用零部件等)和维修操作过程信息 4 类要素。首先,通过数字样机(digital mock-UP,DMU)技术实现对维修对象、维修工具、测试设备、维修设备、保障设施、备用零部件的外观与功能行为表达。其次,利用虚拟人体建模与仿真技术实现对维修人员的行为模拟,包括真实外观、行为特性、运动仿真,以及维修操作等。最终,根据不同的实现方式,交互式 VM 利用维修操作过程信息,通过虚拟人体模型控制算法及 DMU 所提供的功能,驱动虚拟人体模型执行维修操作;沉浸式 VM 则根据维修过

程信息对维修工作状态进行判定,实时读取 VR 外设的输入数据信息,从而在 VME 中正确地表达人体模型与 DMU 的行为变化实现维修作业仿真。

随着 DMU 和 VR 等的飞速发展,VM 为复杂产品的维修训练和维修性分析与设计提供了重要的技术支撑。通过开发具有较好沉浸感、交互性和可感知性的 VMT 环境(VMT environment, VMTE),能够为维修技术部门和操作人员提供一个获取维修知识和操作技能的训练平台。VMT 系统(VMT system, VMTS)基于 VME 创建维修对象和维修资源的数字化模型,利用虚拟的维修过程对维修人员进行教学和训练,从而在缩减训练时间、提高训练效果、降低训练成本、保障人员装备安全和克服环境条件等方面,具有实装训练无法比拟的优势。

自 20 世纪 90 年代初至今,国内外各研究机构 and 高校为了克服大型复杂装备实际维修教学和训练中各种不利因素的制约,针对 VMT 技术及其在复杂系统中的工程应用方面,进行了大量的理论研究、尝试和创新,取得了较好的应用效果。

1990 年,美国 NASA 的哈勃望远镜(Hubble space telescope, HST) VMTS 是该领域的典范^[11,21],也是人类历史上第一次大规模采用 VMT 技术完成实际任务。1992 年,英国的先进机器人研究实验室(ARRL)帮助 Rolls-Royce 公司利用 VR 技术进行飞机发动机的故障检测和维修规程学习。此后,Rolls-Royce 公司又开发研究了一个皇家海军舰载原子能推进系统维修训练项目,取得了良好的军事和经济效益^[22]。1995 年,Lockheed Martin 公司利用 VM 技术很好地解决了 F-16 战斗机项目中的维修性分析和人因学设计方面的技术问题,极大地改善了维修性设计技术手段,促进了维修性工程人员与设计人员的信息交流^[23]。Boeing 公司基于建立的 VR 实验室,采用 VM 技术对联合攻击机 JSF 的保障性进行评估和试验,提高了维修人员参与到 JSF 设计过程早期阶段的能力^[24]。美国空军 Armstrong Lab 与宾夕法尼亚大

学联合开发的 DEPTH (design evaluation for personnel training and human factors) 系统,通过人员训练与人素的设计评估进行维修与保障分析,进而提前确定维修过程内容与过程中的人力资源需求,同时将维修仿真结果输入 IETM (interactive electronic technical manual) 能够形成新的维修训练资料,大大减少了以往重复性的开发工作^[25,26]。1998 年,日本京都大学的 ISHII 等提供了一个可视化的 Petri 网建模工具,用于对虚拟场景对象行为进行较为详细的描述,从而可以快速建立 VR 维修训练系统^[27,28]。美国联邦航空局开发了一个用于飞机检测人员培训的 VR 系统,方便了与飞机维修保障相关的各种研究活动的开展,并加深了受训人员对工效学相关因素对检测过程影响的理解^[29]。新加坡南洋理工大学研发了基于桌面虚拟环境的维修培训系统 V-REALISM,采用面向对象的思想,通过友好的可视化用户界面为培训者提供了操作的方便性和良好的学习环境^[4,5]。

与国外相比,国内对于 VMT 技术及其在实际工程中的应用研究,起步相对较晚,依赖于国外先进的技术平台和国内应用环境的结合。近几年来,随着计算机图形/图像技术、VR 技术、信息技术和软件工程的日新月异,以及制造工业和军事领域日益增长的应用需求,使得国内在该领域的技术研究和应用开发也得以快速发展,取得了一系列的研究成果。

清华大学杨宇航等利用非沉浸式、低成本的桌面式 VR 技术,开发了导弹维修训练系统 (MTS),该系统能够针对不同的维修对象和任务建立相应的维修训练应用系统^[30]。

机械工程学院苏群星等^[6,7]设计了由虚拟样机 (virtual prototyping, VP) 和 VM 过程仿真控制两部分组成的大型复杂装备 VMTS,研究并提供了基于维修知识描述网的维修知识描述方法和沉浸式 VMTS 仿真控制流程。Xie 等^[8]提出一种基于 MAS 的 VMTS 设计方法,建立了 VME 中受训人员的智能模型和虚拟对象的行为模型,介绍了基于概

念模型的多个 Agent 之间的交互和协同机制。方传磊等^[9]对基于资源重用性、系统通用性的导弹装备 VMT 通用平台进行了研究,介绍了通用平台的总体结构设计和基于 EON Studio 开发的 VMT 原型系统。田成龙等^[31]提出 VMT 内容聚合模型,创建了适合 VMT 的元数据,为 VMTS 提供课程内容。赵吉昌等^[32]研究了基于 NGRain 的装备 VMTS 开发,介绍了讲解演示和维修操作训练两类 VM 训练内容的开发经验和方法。

国防科学技术大学卢晓军等^[33]将虚拟人应用于维修仿真过程中,运用虚拟人的几何建模与动作控制技术,基于 Jack 开发环境实现了一个面向维修训练的 VMTS,显著提高 VME 的逼真性和真实感,改善了人机界面的交互性能。

装甲兵技术学院臧国华等^[34]提出一种基于故障传播有向图的故障建模与仿真方法,解决了 VM 对象的数据生成,设计了维修训练的仿真实现。装甲兵工程学院杜松阳等^[35]为提高发动机 VMT 的真实性和实时性,研究了 VMTS 开发过程中的碰撞检测技术和场景优化技术。陈曼青等^[36]提出基于路径包围盒关键点技术的可能性碰撞检测方法的实施策略,并在 VMTS 中进行了实现。

海军工程大学朱晓军等^[37]利用 VR 技术分析了舰船维修虚拟训练平台的系统结构,并对系统实现中的虚拟对象建模和交互控制模块问题进行了研究。海军大连舰艇学院和浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的常高祥等^[38],将数据库技术应用到 VMTS 中,提高了系统开发的效率。

第二炮兵工程大学(现今火箭军工程大学)王强等^[16]利用 NGRain 开发了某型发动机的 VMTS,实现了 VP 模型处理、维修过程仿真动画生成、VM 操作流程控制和 VMT 课程设计。

目前,国内各高等院校针对不同的应用需求,针对开发桌面式或单机维修训练系统的各项使能技术进行研究和分析,取得了一定的阶段