

6-9-2021

Rapid Development Technology of Virtual Maintenance Training Simulation Model for Aviation Equipment

Rongqiang Li

Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Chengdu 610091, China;

Aibing Wen

Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Chengdu 610091, China;

Bin Hua

Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Chengdu 610091, China;

Jiajun Li

Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Chengdu 610091, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Rapid Development Technology of Virtual Maintenance Training Simulation Model for Aviation Equipment

Abstract

Abstract: Taking the practical application of the aircraft virtual maintenance training as the demand, the basic development process and technical means of the aircraft virtual maintenance training simulation model are analyzed, which solves the technical bottleneck in the popularization and application of the large-scale engineering. Aiming at the crucial problems such as the low efficiency in the development of maintenance training simulation model and the difficulties in updating the model, *a rapid development process to support the large-scale engineering applications* is proposed. The principles and implementation ways of three key technologies supporting the rapid development of virtual maintenance training simulation model including *the maintenance task modeling, simulation model assembly and updating* are discussed. The technology is developed and verified by a certain type of engineering example.

Keywords

virtual maintenance, training simulation model, digital mockup, modeling, aviation equipment

Authors

Rongqiang Li, Aibing Wen, Bin Hua, Jiajun Li, and Jiang Bing

Recommended Citation

Li Rongqiang, Wen Aibing, Hua Bin, Li Jiajun, Jiang Bing. Rapid Development Technology of Virtual Maintenance Training Simulation Model for Aviation Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1167-1176.

航空装备虚拟维修训练仿真模型快速开发技术

李荣强, 文爱兵, 花斌, 李嘉骏, 姜兵

(中国航空工业集团公司 成都飞机设计研究所, 四川 成都 610091)

摘要: 以飞机虚拟维修训练的实际应用为需求, 分析了飞机虚拟维修训练仿真模型基本开发流程和技术手段, 解决了开展大规模工程推广应用中的技术瓶颈。针对维修训练仿真模型开发效率低、更新困难等突出问题, 提出了支持大规模工程应用的快速开发流程, 并对支撑虚拟维修训练仿真模型快速开发的维修任务建模、仿真模型装配、仿真模型更新 3 项关键技术的原理及实现途径进行了论述。最后用某型号工程实例进行了技术开发实现并通过应用验证。

关键词: 虚拟维修; 训练仿真模型; 数字样机; 建模; 航空装备

中图分类号: V19; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 05-1167-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0107

Rapid Development Technology of Virtual Maintenance Training Simulation Model for Aviation Equipment

Li Rongqiang, Wen Aibing, Hua Bin, Li Jiajun, Jiang Bing

(Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Chengdu 610091, China)

Abstract: Taking the practical application of the aircraft virtual maintenance training as the demand, the basic development process and technical means of the aircraft virtual maintenance training simulation model are analyzed, which solves the technical bottleneck in the popularization and application of the large-scale engineering. Aiming at the crucial problems such as the low efficiency in the development of maintenance training simulation model and the difficulties in updating the model, a rapid development process to support the large-scale engineering applications is proposed. The principles and implementation ways of three key technologies supporting the rapid development of virtual maintenance training simulation model including the maintenance task modeling, simulation model assembly and updating are discussed. The technology is developed and verified by a certain type of engineering example.

Keywords: virtual maintenance; training simulation model; digital mockup; modeling; aviation equipment

引言

航空装备研制全面采用三维数字化研制手段, 采用三维数字模型进行产品设计定义, 实现了设计到生产制造的全数字量传递, 同时以三维数字样机为主要数据源的虚拟维修训练也得到了广泛深入研究。虚拟维修训练的核心是建立可模拟实装维修

的虚拟样机, 部分替代实装开展维修训练, 一方面训练场景和操作程序能够还原真实工作场景和过程, 受训人员能够以互动形式获得逼近真实体验感的操作反馈, 另一方面可以建立任何尺度的视角, 彻底打破时间与空间的限制, 具有可降低对实装损耗、训练针对性更强、效率更高等优势, 已成为航空装备应用的重要发展方向^[1-2]。

收稿日期: 2020-03-06

修回日期: 2020-08-13

第一作者: 李荣强(1978-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为软件开发与应用。E-mail: rqli1978@sina.com

国外以美国洛克希德·马丁公司为代表的航空企业,研发了 F-35A 飞行和维修训练系统,其中包括 6 种虚拟维护维修训练器,仅飞机系统维修训练器(ASMT)一项,就能支持学员训练 100 多种组件的维修方法,含发动机维修的内容和方法。这些训练器已在埃格林空军基地应用,目标是培养专家型人才,利用模拟器材和训练想定学会各种专业维修技能,使维修任务更加高效,提升训练质量,节约维修成本和人力资源^[3-4]。

国内虚拟维修训练研究主要集中在训练系统设计、开发实现、平台集成、三维模型设计、行为建模、交互控制等技术方向^[5-7]。当前虚拟维修训练主要基于已有商品化软件进行集成与定制开发,针对具体问题进行仿真模型构建,存在建模工作量大、模型不可重用、开发效率低、数据更新困难等问题,难以在实装型号上大规模应用推广,总体上处于实验室研究或局部应用验证阶段。

本文针对航空装备模型数据量大、状态更改频繁的特点,提出虚拟维修训练仿真模型的快速开发流程,以细粒度、模块化的数据集成方式,降低数据间的耦合度,实现仿真模型快速建模、装配,提高仿真模型建模与更新效率,从而支持航空装备虚拟维修训练大规模工程应用。

1 虚拟维修训练仿真模型的基本开发流程

飞机等复杂航空装备的维护维修教学训练,主要包括系统组成与原理教学、维护维修流程教学与训练、维护维修操作教学与训练、维护维修训练考核等方面的内容^[8]。采用三维模型展示、维修过程运动仿真、虚拟人机交互操作等手段,结合空间手柄、手势识别等新型人机交互设备,可较好满足上述各类教学培训的应用场景需求。飞机设计过程中产生三维数字样机、产品使用维护规程数据库等设计成果,为虚拟维修仿真模型开发以及规模化工程应用创造了有利条件^[9-10]。

基于数字样机的维修训练仿真模型开发,综合运用了虚拟维修样机建模、运动仿真建模、维修流程仿真建模、虚拟现实人机交互设计等技术手段,基本的开发流程如图 1 所示。

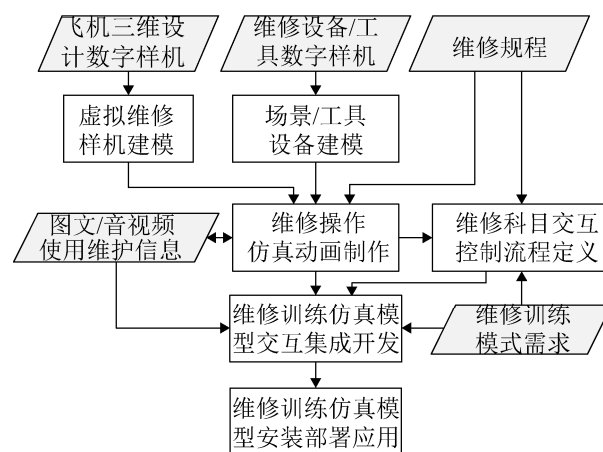


图 1 虚拟维修训练仿真模型基本开发流程

Fig. 1 Basic development process of virtual maintenance training simulation model

归纳起来,可以描述为以下几个方面的内容:

(1) 虚拟样机建模:包括飞机产品的虚拟维修样机建模,以及与维修科目相关的工具、设备、场景等对象的建模^[11-12]。

(2) 仿真动画制作:根据维修训练模式和应用场景的需求,对维修操作过程进行分段仿真建模或动画制作。

(3) 交互控制流程定义:分析维修科目的操作流程,对仿真模型交互控制流程进行颗粒度分级定义,主要描述各操作间层级关系、依赖关系、触发条件、响应动作等方面的内容,作为维修科目演示进度控制、交互操作流程控制、人机交互响应控制等逻辑控制输入^[13]。

(4) 交互集成开发:在集成开发环境下,整合虚拟样机、仿真动画、维修流程等模型数据,集成人机交互控制设备,开发仿真模型界面 UI、内容调度逻辑、流程控制逻辑、训练学习数据记录、训练效果评估等功能,最终形成虚拟维修训练仿真模型^[14-15]。

在实际工程应用中, 由于飞机零部件数量庞大、技术状态变更频繁、维修科目多且过程复杂, 导致仿真模型建模工作量大、制作成本高、制作周期长、修改更新难度大等诸多问题, 严重制约了虚拟维修训练在该领域的大规模应用。通过分析图 1 中各开发环节及其之间的关系, 并结合实际工程实践经验, 产生以上问题的主要原因有:

(1) 利用现有通用商品化建模软件的模型处理、材质处理、BOM 树编辑等功能, 采用人工方式对数万零件、数十 G 的模型数据进行处理重构, 工作量大且繁琐;

(2) 三维模型、运动仿真数据、操作流程、交互控制流程等数量庞大的各类信息相互混杂交联, 使得各阶段开发的中间成果可重用性低, 严重影响开发效率;

(3) 在交互集成开发方面, 缺乏一种适用于复杂维修操作流程的建模和运行控制驱动方法, 导致训练仿真模型功能逻辑抽象程度低, UI 界面、交互功能等与维修科目内容高度耦合, 不同仿真模型之间只能实现代码级别的重用。

此外, 维修训练仿真模型需要依据产品设计更改进行同步更新, 以上方法因数据、程序高耦合导致更改影响面大、工作量大, 往往无法及时响应更改需求。

2 支持大规模工程应用的快速开发流程

复杂航空装备虚拟维修仿真模型快速开发技术的基本思想是, 通过提高开发过程中各工作环节的自动化程度、提高各环节数据要素的可重用性和管理能力、降低仿真模型交互功能与训练科目内容的耦合度, 实现虚拟维修训练仿真模型的快速开发和更改响应。飞机虚拟维修训练快速开发流程如图 2 所示。仿真模型快速开发技术的实现基础, 包括模型自动化处理、维修操作流程建模、虚拟维修综合建模与管理、仿真模型快速自动化装配、数据管

理与更改影响分析等多个方面的技术和方法。

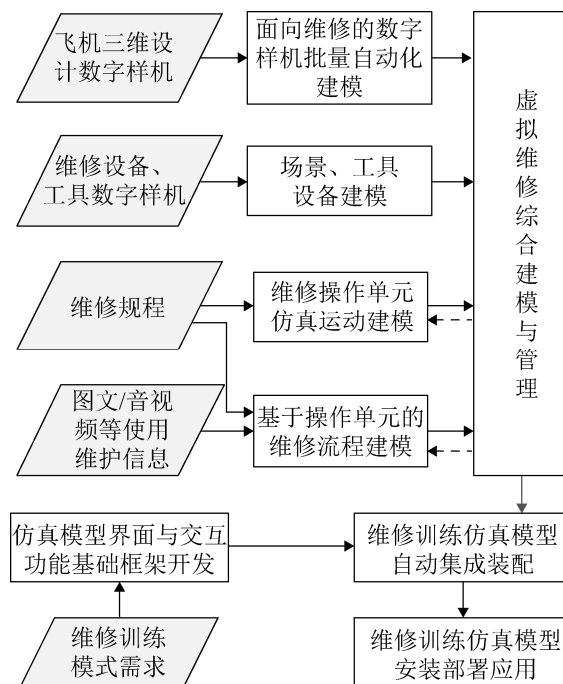


图 2 虚拟维修训练仿真模型快速开发流程

Fig. 2 Rapid development process of virtual maintenance training simulation model

(1) 面向维修的数字样机批量化建模: 基于自动化工具集实现设计模型到虚拟维修数字样机的转换处理。采用模型自动轻量化技术实现各精度级别的样机模型轻量化处理、基于渲染材质库实现零部件渲染材质的自动匹配定义、采用维修构型清单实现 BOM 的自动重建。

(2) 维修操作单元仿真运动建模: 将最小可维修零部件的操作动作定义为操作单元, 以此为分割标准进行运动仿真建模和仿真运动数据抽取, 完成操作仿真定义工作。每个操作单元定义一个维修行为基本元素, 以及它的仿真运动数据。

(3) 基于操作单元的维修流程建模: 基于操作单元的维修操作流程建模, 以操作单元为基本要素, 采用分层级的有向图定义一个维修科目的操作流程或局部流程, 支持流程的组合与重用。

(4) 虚拟维修综合建模与管理: 构建虚拟维修训练综合数据模型, 集成产品轻量化模型、工具设备模型、操作单元运行数据、维修工卡步骤模型、

维修任务流程模型等各类信息要素,并实现按型号项目的仿真模型开发过程数据管理能力。

(5) 维修训练仿真模型自动化集成装配:交互集成开发工作是仿真模型软件代码开发的主要阶段,快速开发方法中采用基础框架加内容集成的技术手段,实现软件系统灵活性和可重用性。采用模块化方法开发UI界面、训练场景、人机交互响应等软件功能,形成仿真模型的基础功能框架。利用集成装配工具,将轻量化模型、维修任务流程、操作单元运动数据、使用维护图文音像信息等进行自动化组装形成最终的训练仿真模型。

3 虚拟维修训练仿真模型快速开发关键技术

3.1 基于操作单元的维修任务综合建模方法

3.1.1 基于操作单元的维修流程建模机理

飞机训练科目中的维修任务,按照“维修任务→工作卡→操作单元”3级多层定义方式,自顶向下逐层分解,直至分解到操作单元。维修任务作为1级节点,由若干个工作卡或操作单元组成。工作卡作为2级节点,由若干操作单元组成。操作单元作为3级节点,是对某个零部件操作的最小行为动作。维修任务流程的定义层次,如图3所示。

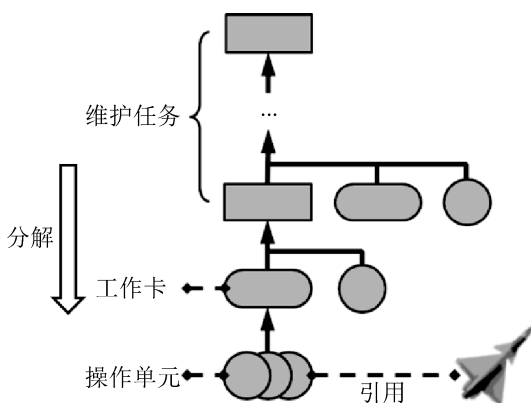


图3 维修任务流程的定义层次

Fig. 3 Definition level of maintenance task process

操作单元以操作动作作为主模型,关联维修仿真资源,包括数字样机模型、运动描述文件、维修操

作说明、工种要求、设备工具、考核内容等。维修任务建模时,操作单元根据训练科目自底向上逐层组合,拼装生成维修任务仿真模型,如图4所示。

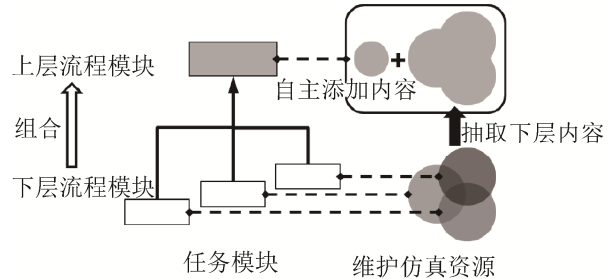


图4 维修任务模块与相应的相关资源的组合

Fig. 4 Combination of maintenance task modules and related resources

基于上述分级、离散的数据组织管理模式,当飞机设计或维修规程发生更改时,已有的维修任务模型仅需替换发生更改的部分,即可快速生成新的维修任务模型,方便快捷。

3.1.2 多维数据关联集成方法

虚拟维修训练仿真模型是综合数据集,包括样机模型、维修操作、工具设备、维修流程、功能描述信息、使用维护信息、训练考核评价数据等。通过定义各类数据之间的接口规范,构建数据关联关系,实现多维离散数据的关联集成,从而生成面向维修的综合数字样机模型。多维数据关联关系,如图5所示。

维修任务/工作卡信息是主数据源,描述维修任务或工作卡流程。维修流程节点信息用于在交互定义模块中动态创建流程菜单。操作单元信息描述操作单元样机模型、配套工具、节点类型以及节点定义属性信息。维修对象运动信息是维修对象的运动轨迹数据,使用该数据驱动维修对象模型运动。工具模型信息定义工具模型的实例名以及工具的类型和规格。样机模型信息定义样机模型的实例名、功能描述和维修描述。功能描述信息关联样机模型的功能描述、系统原理图、主要技术数据等图文、视/音频资源。维修描述信息关联样机模型的维修注意事项等图文、视/音频资源。

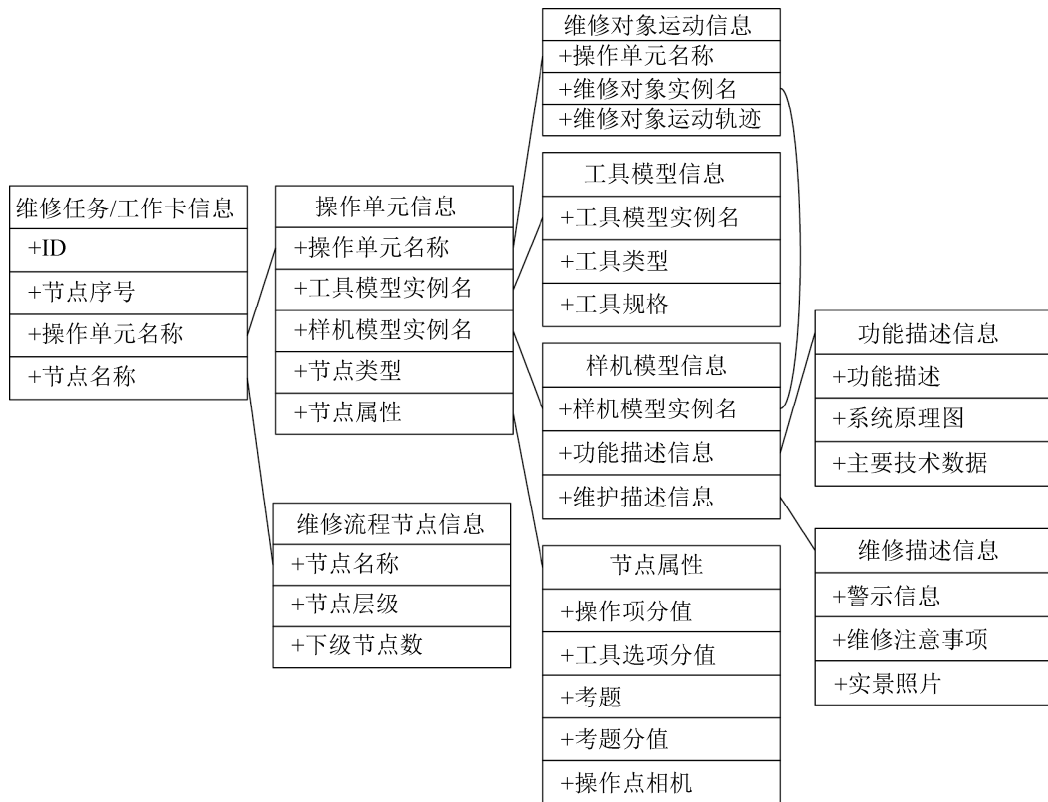


图 5 多维数据关联关系
Fig. 5 Multi-dimensional data association

3.2 虚拟训练仿真模型快速装配技术

3.2.1 支持多平台的交互控制模块

当前虚拟维修训练的硬件环境主要有多通道沉浸式、桌面单机式与 VR 头盔式 3 种类型, 可对应支持不同的训练方式: 多通道沉浸式同时支持多人参与, 方便教员一对多培训学员; 桌面单机式部署便捷, 适合学员自学维修过程; VR 头盔式具有极强的真实操作体验感, 支持学员在虚拟环境中模拟训练。

匹配多通道沉浸式、桌面单机式与 VR 头盔式 3 种类型的交互环境和交互设备, 分别开发与其对应的交互界面和交互控制模块。根据空间手柄、鼠标、头盔手柄不同交互设备定义按键响应, 并在每一个交互控制模块中将其设定“选择”、“确认”、“返回”等通用信号参数。逻辑控制模块中的各组件通过识别通用信号参数, 响应交互操作。从而实现了任一交互控制模块与逻辑控制模块装配, 快速生成

在指定交互环境下的训练仿真模型基础框架。多平台交互控制定义方法如图 6 所示。

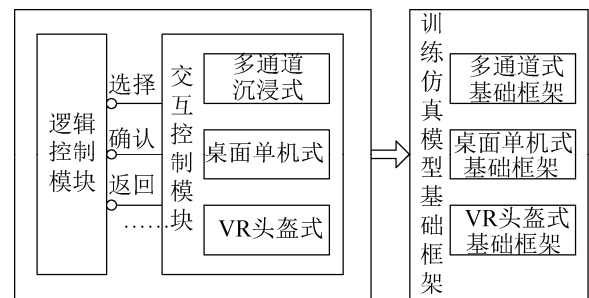


图 6 多平台交互控制定义方法
Fig. 6 Method of multi-platform interactive control definition

3.2.2 支持多应用模式的逻辑控制模块

虚拟维修训练的应用模式主要有构造理论教学、维修规程教学、维修规程训练和维修规程考核 4 种。

(1) 构造理论教学: 学员在虚拟环境中实时漫游, 查看飞机的结构、系统、设备信息及运行原理。

(2) 维修规程教学：学员根据维修任务自学维修操作的全过程或部分过程，学习操作方法和注意事项等。

(3) 维修规程训练：学员在有操作步骤提示的情况下，在虚拟样机模型上选择当前步骤需操作的模型对象、工具，演练维修过程。

(4) 维修规程考核：学员在接到维修任务后，无操作步骤提示，直接对虚拟样机模型进行维修操作、工具选择、考题回答，记录得分、操作时间等信息并给出评价。

将 4 种应用模式的功能分解为 16 个功能响应组件，通过组件装配生成匹配模式的主程序见图 7。

主程序只需简单实现功能响应组件的串联、各类参数的判断等整体的逻辑控制，具体的功能运行都在各功能响应组件中完成。

本文以维修规程教学为例，演示功能响应组件装配关系，如图 8 所示。

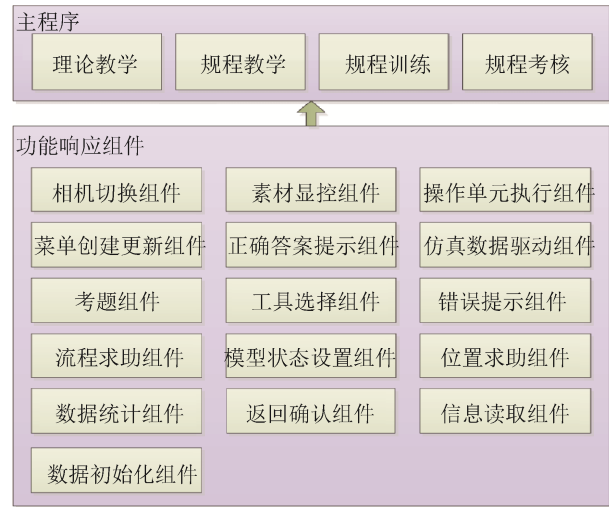


图 7 逻辑控制模块功能响应组件构成
Fig. 7 Composition of function response component in logic control module

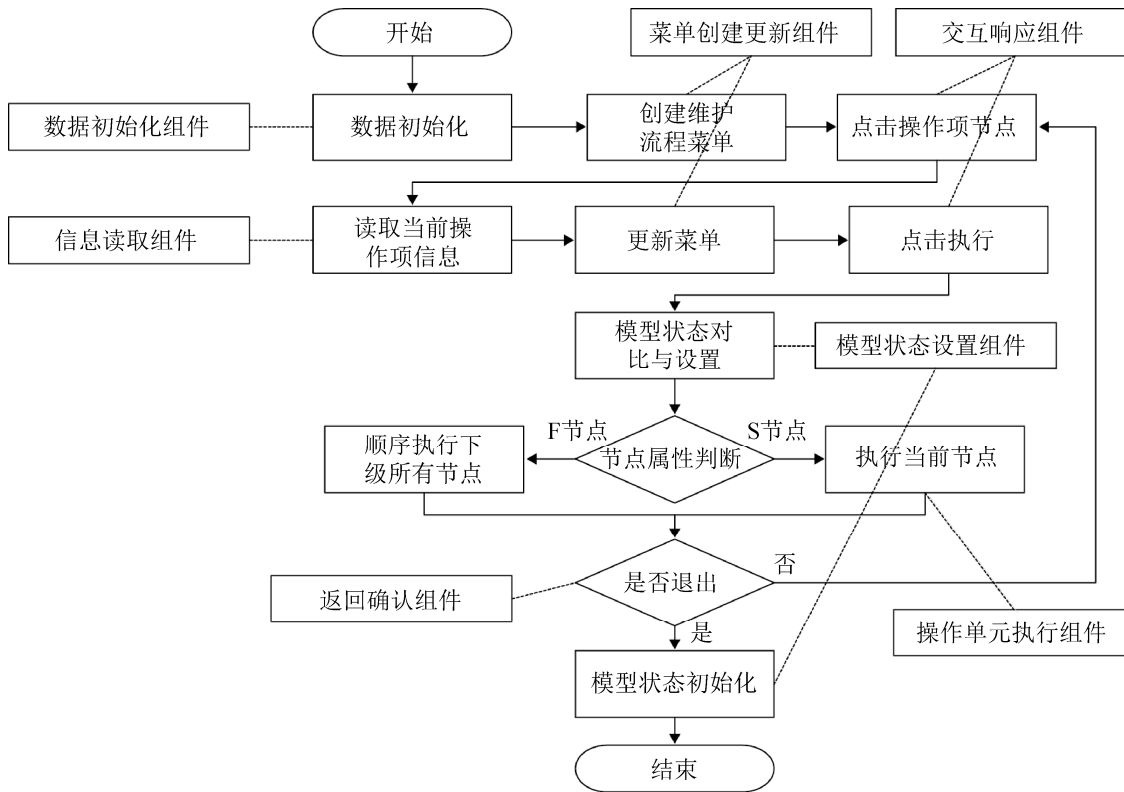


图 8 维修规程教学组件装配
Fig. 8 Component assembly of maintenance discipline teaching

3.3 面向工程更改的仿真模型快速更新

在飞机全生命周期内，设计上的各类更改极

其频繁，与样机模型相关的主要有外形变化、结构调整、设备安装位置调整、飞机系统升级等。

虚拟维修训练仿真模型与匹配状态的飞机保持一致, 才能指导学员正确训练, 否则极易发生误操作, 损伤飞机。

当飞机设计更改时, 若不能准确捕获并抽取更改对象和更改结果, 训练仿真模型中的样机模型则需要全部重新提取处理。采用面向工程更改的仿真模型快速更新方法, 可识别出样机模型更改项, 通过一致性传递, 实现从工程设计数据源到训练仿真模型的全数据链传递。

3.3.1 基于统一编号规则的样机模型一致性传递

虚拟维修训练仿真模型使用的样机模型来自于 PDM 系统, PDM 系统中的配置项(CI 项)遵循统一的编号规则。采用基于统一编号规则的样机模型一致性传递方法, CI 项模型从 PDM 中导出经处理、整合后形成面向维修的数字样机模型, CI 项编号及其内部结构始终保持不变, 保证样机模型数据的唯一数据源, 模型版本可追溯。样机模型一致性传递关系如图 9 所示。

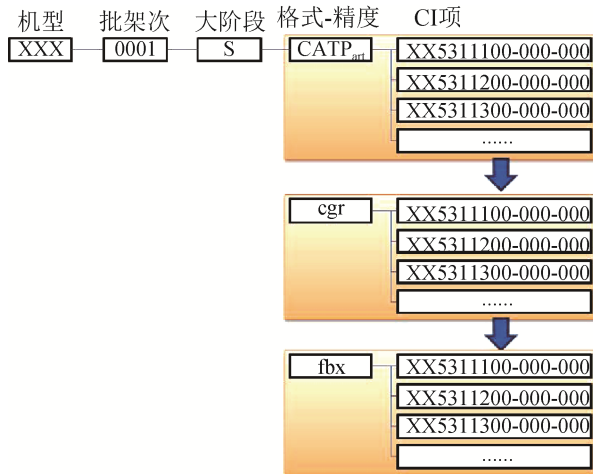


图 9 基于统一编号规则的样机模型一致性传递
Fig. 9 Consistent transfer of prototype model based on unified numbering rule

指定机型、批架次、大阶段的飞机样机模型在 PDM 系统中以 CATIA 数据格式 CATPart 管理, 以 CI 项为单位通过批量自动化简化处理后转换成 CATIA 轻量化数据格式 cgr, 减少模型数据量, 进

一步将 cgr 模型转换成中性格式 fbx, 从而支持多款图形引擎加载使用。

3.3.2 面向设计更改的训练仿真模型快速更新方法

虚拟维修训练仿真模型使用的样机模型是以 CI 项为单位、以维修 BOM 为顶层结构组合生成的, CI 项模型以离散化的方式管理, 且与 PDM 系统中的产品编号保持一致。因此当设计数模发生更改后, 虚拟维修训练仿真模型中的样机模型只需替换更改项即可实现仿真模型更新。仿真模型更新顺序图如图 10 所示。

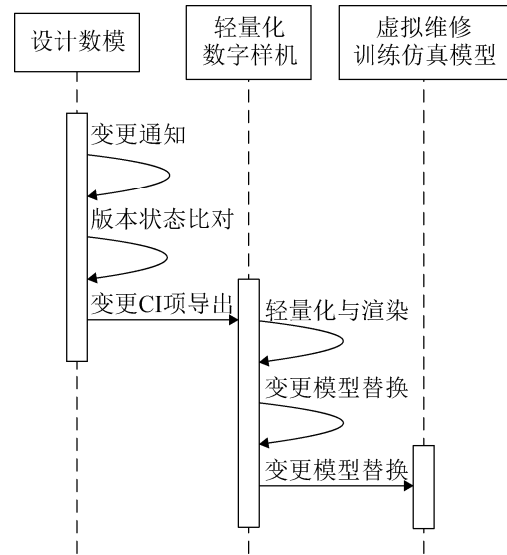


图 10 仿真模型更新顺序图

Fig. 10 Sequence diagram of simulation model update

PDM 系统设计数模发生版本变更, 通过比对 CI 项的新旧版本状态, 自动识别对样机模型产生影响的更改。按照数字样机建模流程, 对变更 CI 项进行轻量化和材质渲染, 使其与仿真模型中的模型格式匹配。最终逐级替换到虚拟维修训练仿真模型中, 实现仿真模型的快速更新。

4 训练仿真模型快速开发实现及演示验证案例

本文以某型飞机发动机拆卸维修为演示验证对象, 基于 Unity3D 图形引擎, 开发了虚拟维修训

练仿真模型。飞机发动机维修是典型复杂维修任务，操作步骤多，维修难度大。本文构建了某型飞机发动机维修的完整训练案例，相关数据见表 1。

表 1 某型飞机发动机维修任务数据

Tab. 1 Engine maintenance task data of a certain type aircraft

序号	名称	数量
1	样机模型	1 套
2	工装模型	2 个(发动机架车、千斤顶)
3	工具模型	10 个(常用工具)
4	维修流程节点	62 个
5	操作单元	49 个
6	维修图文文件	68 个

构建了高逼真轻量化数字样机模型 1 套，如图 11 所示。



图 11 高逼真轻量化数字样机
Fig. 11 High fidelity and lightweight digital mockup

创建维修流程共 62 个节点，建立发动机维修流程数字模型，以连线框图的方式，清晰表达了维修流程节点间的顺序和嵌套关系，如图 12 所示。

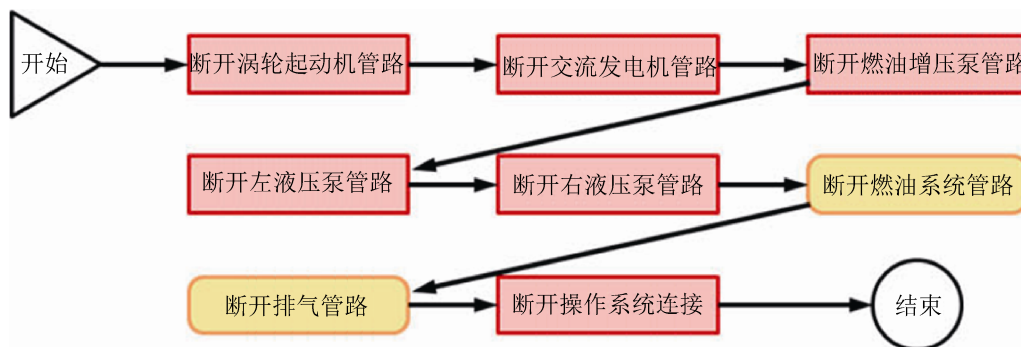


图 12 发动机维修流程模型
Fig. 12 Engine maintenance process model

定义各节点的关联样机模型、权重分值、使用工具等相关信息。经数据综合集成，构建的虚拟维修训练仿真模型，如图 13 所示，该模型支持多平台部署和多训练模式应用。

训练仿真模型快速开发效果见表 2。

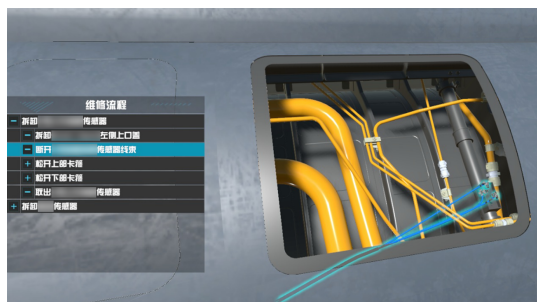


图 13 发动机拆卸虚拟维修训练仿真模型示意
Fig. 13 Virtual maintenance training simulation model of engine disassembly

表 2 某型飞机发动机维修训练仿真模型快速开发效果
Tab. 2 Rapid development effect of a certain type aircraft engine maintenance training simulation model

内容	开发效果
样机模型处理	全机约 10 万个零部件，完成零件级轻量化与渲染，约 20 天
维修流程建模	根据维修任务建立数字化维修流程模型，约 4 天
首次开发	维修仿真动作建模 完成 49 个操作单元仿真动作建模，约 15 天
训练仿真模型集成发布	将样机模型、维修流程综合数据、操作单元等数据灌装到训练仿真模型基础框架中集成，并发布到指定环境中，约 2 天
样机模型更新	更新 10 个 CI 项，完成轻量化、渲染和替换，约 4 h
数据更新	维修流程调整维修流程顺序，或新增、删除个别节点，约 30 min
建模更新	维修仿真动作建模 完成 3 个操作单元仿真动作重新建模与数据替换，约 1 h

工程设计软件(如 CATIA、UG 等)产生的数字样机模型无法直接导入 Unity3D 中,通常采用的方法是在 Maya, 3DMax 等软件中重构样机模型、定义仿真动作,再导入 Unity3D 中开发集成,工作量巨大。一般一个型号的训练仿真模型从样机模型处理到完成集成开发约需 10 人月完成;采用快速开发仅需 2 人月完成,效率提升约 5 倍。

由于数字样机模型通过手工重构通常会破坏其产品结构,打断了其与设计数模的数据链关联关系,从而当航空装备产品设计发生更改时,训练仿真数字样机模型一般会出现较大返工,甚至整机重新建模,同时由于样机模型与仿真运动耦合度高,样机模型更新后,仿真运动也需要重新建模,平均约 3 人月完成;而快速开发中由于采用了统一编号规则的传递技术和数据离散化管理方法,只需提取发生更改的模型,单独处理与替换,训练仿真模型即可完成版本更新,平均约 1 人天内完成,效率提升达 100 倍数量级。

5 结论

本文研究内容紧扣航空装备工程应用实际需求,以问题为导向,采用的虚拟维修仿真模型快速开发流程及技术途径,经型号工程验证切实可行,可解决当前虚拟维修训练难以大规模工程推广应用的主要技术瓶颈,能够实现维修训练仿真模型开发效率大幅提升,并支持设计更改驱动的仿真模型快速更新。本文研究成果可在航空装备虚拟维修训练中进行工程推广应用,同时船舶、兵器、轨道交通、工程机械等复杂装备领域亦可参考借鉴。

参考文献:

- [1] 吴思亮, 韩兵, 陈宇, 等. F-35A 维修训练体系建设评析[J]. 航空维修与工程, 2018(4): 27-29.
Wu Siliang, Han Bing, Chen Yu, et al. Analysis on the Construction of F-35A Maintenance Training System[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(4): 27-29.
- [2] 罗一丹, 王南松. 装备虚拟维修培训系统设计与实践[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(7): 155-168.
Luo Yidan, Wang Nansong. Design and Implementation of Equipment Virtual Maintenance Training System[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(7): 155-168.
- [3] Manoch N, Andreas R, Frederic N. Virtual Reality Based Digital Chain for Maintenance Training[J]. Procedia CIRP (S2212-8271), 2019, 84: 1069-1074.
- [4] Pak K K, Mian Y, Bill K P C, et al. Crisis Management Training using Discrete-event Simulation and Virtual Reality Techniques[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2019, 135: 711-722.
- [5] Li B C, Bo M, Jie C. Maintenance and Management of Marine Communication and Navigation Equipment Based on Virtual Reality[J]. Procedia Computer Science (S1877-0509), 2018, 139: 221-226.
- [6] Bailin L, Yaxiong B, Qiang H, et al. A Low-complexity Method for Authoring an Interactive Virtual Maintenance Training System of Hydroelectric Generating Equipment[J]. Computers in Industry (S0166-3615), 2018, 100: 159-172.
- [7] Liu Z, Zhao Q, Zhu H, et al. The Virtual Simulation System for Training and Demonstrating the Design of the Head-end of Spent Nuclear Fuel Reprocessing[J]. Annals of Nuclear Energy (S0306-4549), 2017, 108: 310-315.
- [8] 李文正. 飞机设计流程解析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
Li Wenzheng. Elaboration on Aircraft Design Process[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [9] 陈祎. 基于 SCORM 虚拟维修训练系统研究与设计[D]. 天津: 中国民航大学, 2015: 1-58.
Chen Yi. Research and Design of Virtual Maintenance Training System Based on SCORM[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2015: 1-58.
- [10] 华钱锋, 屠立. 面向复杂装备维修的虚拟现实集成平台[J]. 装备制造技术, 2019(3): 165-186.
Hua Qianfeng, Tu Li. Virtual Reality Integrated Platform for Complex Equipment Maintenance[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(3): 165-186.
- [11] 白金鹏, 刘虎, 武哲, 等. 面向数字化技术支援的数字样机逐层轻量化技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(8): 1143-1148.
Bai Jimpeng, Liu Hu, Wu Zhe, et al. Layer-by-layer Lightweight Technology of Digital Prototype for Digital Technology Support[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(8): 1143-1148.
- [12] 李星新, 郝建平, 赵春宇, 等. 支持装备维修训练的虚拟样机模型研究[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2010, 26(13): 30-32.

- Li Xingxin, Hao Jianping, Zhao Chunyu, et al. Research on Virtual Prototype Model Supporting Equipment Maintenance Training[J]. *Microcomputer Information (Measurement & Control)*, 2010, 26(13): 30-32.
- [13] 徐文胜, 武博, 蒋坚鸿. 武器装备虚拟维修训练系统行为树设计与实现[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(7): 2722-2728.
- Xu Wensheng, Wu Bo, Jiang Jianhong. Design and Implementation of Behavior Tree of Weapon Equipment Virtual Maintenance Training System[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(7): 2722-2728.
- [14] 蔡凯骏, 张伟明, 赵鸿飞, 等. 面向拆装训练的输油泵机组虚拟维修系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27(4): 218-244.
- Cai Kaijun, Zhang Weiming, Zhao Hongfei, et al. Design of Virtual Maintenance System for Oil Pump Unit for Disassembly and Assembly Training[J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(4): 218-244.
- [15] 姚智刚, 马俊涛, 吕萌. 某雷达维修训练模拟器的设计与实现[J]. *虚拟现实技术*, 2018, 37(9): 64-66, 130.
- Yao Zhigang, Ma Juntao, Lü Meng. Design and Implementation of a Radar Maintenance Training Simulator[J]. *Virtual Reality Technology*, 2018, 37(9): 64-66, 130.