

航空发动机附件虚拟维修技术研究*

Research on the Application of Virtual Maintenance Technology for Aero Engine Accessories

■ 黄湘龙 / 中国航发湖南动力机械研究所 廖敏捷 / 中国航发南方工业有限公司
程冲 蔡景 王正琳 / 南京航空航天大学

随着航空工业的发展，传统航空发动机附件维修方式暴露出诸多不足，虚拟维修技术以其高效、直观的优势成为重要发展方向。

航空发动机附件的维修工作仍然主要依赖于传统的实体维修方式，如人工拆解、逐一检测以及物理修复等，这种传统的维修方式在实践中逐渐暴露出诸多不足。其中，最为显著的问题包括维修周期过长、成本高昂以及整体效率低。随着航空工业的快速发展，航空发动机及其附件的设计日益复杂，集成度也不断提高，这无疑对传统维修方式提出了更大的挑战。由于附件结构的复杂性和高度集成化，维修人员需要具备更高的专业知识和技能水平，才能准确诊断并修复故障。同时，传统维修方式在应对复杂故障时，往往需要耗费大量时间和资源，这不仅影响了航空器的正常使用，还可能因维修延误而带来额外的经济损失。因此，探索新的、更为高效的维修方式成为航空发动机维修领域的当务之急^[1]。

随着计算机技术和虚拟现实技术的飞速发展，虚拟维修技术逐渐崭露头角，并被认为是未来航空发动机维修领域的重要发展方向。虚拟维修技术通过构建数字化的维修环境和虚拟样机，使得维修人员能够在计算

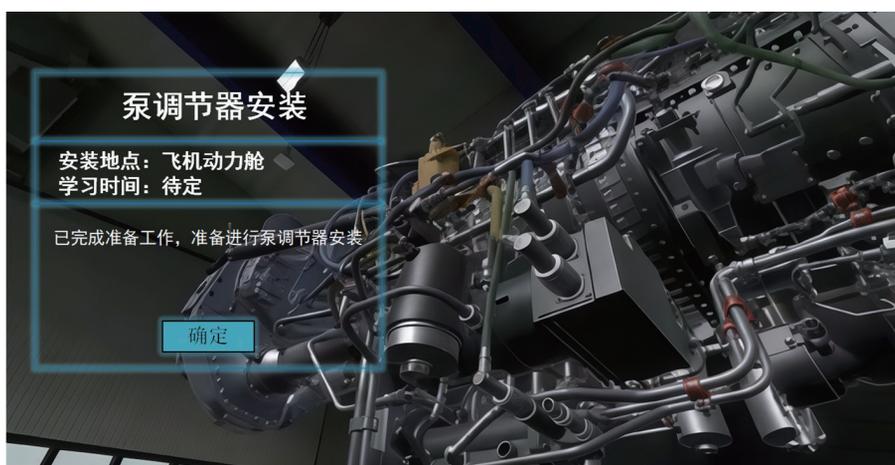


图1 虚拟维修技术示意

机生成的虚拟空间中进行模拟维修操作，这种方式不仅能够提供更为直观、真实的维修体验，还有助于提高维修人员的技能水平和操作熟练度。同时，虚拟维修技术还具有诸多传统维修方式无法比拟的优势：能够在不破坏实体部件的情况下进行故障模拟和诊断，从而大大降低了维修成本和风险；虚拟维修环境还可以根据实际需求进行灵活调整和优化，以适应不同型号、不同故障的航空发动机附件维修需求。这些优势使得虚拟维修技术在航空发动机维修领域具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。

虚拟维修技术理论 虚拟现实技术

虚拟现实（VR）是一种通过计算机生成三维环境，并允许用户与之进行交互的先进技术。在航空发动机附件维修领域，VR技术的应用为维修人员提供了一个模拟真实维修场景的平台，从而极大地提升了维修效率和操作体验，如图1所示^[2]。VR技术具有三大显著特点：沉浸性、交互性和构想性。沉浸性指的是用户能够身临其境地感受到虚拟环境所带来的真实感，仿佛置身于一个真实的维修现场，这种沉浸感有助

* 基金项目：中国航空发动机集团产学研合作项目（HFZL2022CXY006）

于维修人员更好地集中注意力，提高维修操作的准确性；交互性则是指用户可以与虚拟环境中的对象进行实时互动，如拆卸、安装、检测等，这种互动性使维修人员能够在不接触实际设备的情况下，模拟真实的维修流程，从而有效地避免操作失误和设备损坏；构想性则体现在VR技术能够根据用户需求构建出任意复杂的维修场景和模型，为维修人员提供丰富的实践机会和学习资源。

在航空发动机附件维修中，VR技术的应用不仅限于模拟维修操作，还可用于维修人员的培训和考核。通过构建虚拟维修平台，维修人员可以在安全、经济、环保的环境下进行反复练习，直至熟练掌握各项维修技能，同时，VR技术还能够实时记录维修人员的操作过程，为后续的考核和评价提供客观、准确的数据支持^[3]。

增强现实技术

增强现实（AR）技术是一种创新的信息交互方式，其核心在于将计算机生成的虚拟信息叠加到现实世界中，使用户能够在实际环境中看到额外的信息层。在航空发动机附件维修领域，这一技术的应用为维修人员提供了全新的操作体验和

效率提升。

通过佩戴增强现实眼镜或其他设备，维修人员能够在维修过程中看到虚拟的维修指南、操作步骤、零件信息和安全提示等，从而更加准确地完成维修任务。这种技术的引入，极大地降低了维修人员对于纸质手册或电脑查询的依赖，提升了操作的便捷性和准确性。例如，在维修航空发动机附件时，增强现实技术可以实时显示各个部件的名称、功能以及拆卸和安装的步骤，维修人员只需通过眼前的虚拟指示，便可逐步进行操作，大大降低了操作失误的可能性，如图2所示。同时，该技术还能够提供实时的故障诊断和解决方案，帮助维修人员迅速定位并解决问题。

除了直接辅助维修操作外，AR技术还在远程协作和维修培训方面发挥重要作用。在远程协作方面，专家可以通过增强现实设备，实时看到现场维修人员所看到的场景，并提供远程指导和支持，这种“身临其境”的协作方式，显著提高了沟通效率和问题解决速度。在维修培训方面，增强现实技术为新员工提供了一个安全、受控的学习环境，通过模拟真实的维修场景和步骤，

新员工可以在不实际操作真实设备的情况下，进行反复的模拟练习，从而快速掌握维修技能^[4]。

三维建模与仿真技术

在航空发动机附件虚拟维修技术的研究中，三维建模与仿真技术发挥着至关重要的作用。通过运用这一技术，可以构建航空发动机附件的精准三维模型，进而对其进行详尽的仿真与分析，这不仅有助于维修人员深入理解维修过程中的潜在问题和风险，而且对于优化和改进虚拟维修系统也具有重要的指导意义^[5]。

三维建模技术的运用，使得工程人员能够根据实际的航空发动机附件，创建出高精度的三维数字模型，这些模型不仅外观逼真，而且能够准确反映附件的内部结构和工作原理，如图3所示。通过专业的建模软件，工程人员可以对模型的每一个细节进行精细刻画，从而确保其在后续的仿真分析中具有高度的可靠性和准确性。

在建立了精确的三维模型之后，仿真技术便被用于模拟真实的维修场景和操作过程。这包括对各种维修工具的使用、拆解和装配步骤的模拟，以及可能出现的故障情况的预测等。通过这种仿真，维修人员

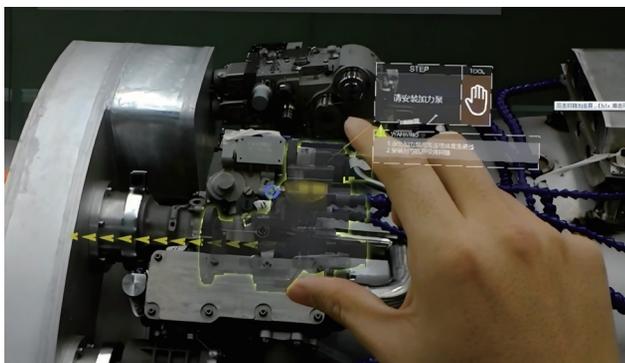


图2 增强现实技术示意

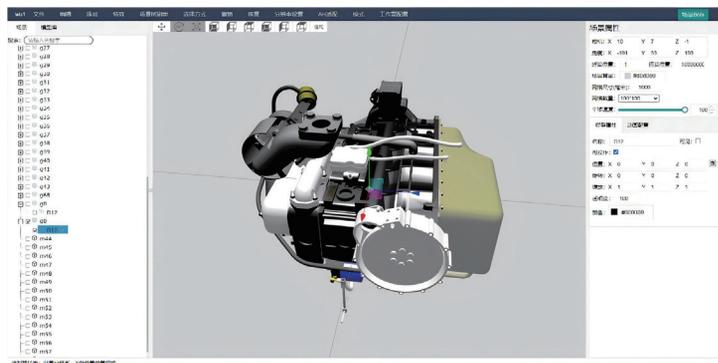


图3 三维模型

可以在一个安全的虚拟环境中进行实践，从而在实际操作中更加熟练和自信，此外，仿真结果还可以为维修人员提供有价值的反馈，帮助他们更好地识别并纠正潜在的操作错误。

航空发动机附件虚拟维修系统

系统架构

在航空发动机附件虚拟维修系统的架构设计中，各层级之间的协同作用和相互依赖关系构成了系统的核心结构，主要包括用户界面层、业务逻辑层以及数据存储层，如图4所示。

用户界面层作为系统的最前端，直接面向维修人员，提供了直观、便捷的交互方式。通过虚拟现实技术，用户界面层能够呈现出高度逼真的航空发动机附件维修场景，使维修人员仿佛置身于真实的维修环境中；同时，该层级还集成了丰富的工具选择功能，维修人员可以根据维修需求快速选择合适的工具进行操作，这种沉浸式的交互体验极大地提高了维修人员的操作效率和准确性。

业务逻辑层是虚拟维修系统的核心部分，负责处理来自用户界面的各种请求和指令。这一层级通过复杂的算法和逻辑判断，实现了虚拟维修过程中的各种操作，如附件的拆解、检测、修复等。此外，业务逻辑层还具备强大的数据处理能力，能够对维修过程中产生的各种数据进行分析 and 优化，从而为维修人员提供更加精准的操作建议，这种智能化的处理方式不仅提高了维修效率，还降低了人为因素导致的维修误差。

数据存储层则是整个虚拟维修系统的数据基础，负责存储和管理维修过程中产生的所有数据和信息。这一层级采用了先进的数据存储技术，确保了数据的安全性和可靠性。同时，通过高效的数据检索机制，维修人员可以快速获取所需的维修记录、模型数据等信息，为后续的维修工作提供有力的支持。

在航空发动机附件虚拟维修系统的架构设计中，各层级之间的通信和协作也是至关重要的，通过标准化的接口设计，各个模块之间实现了紧密的连接和高效的数据传输。

这种模块化的设计方式不仅提高了系统的可扩展性和维修性，还为未来的功能升级和拓展奠定了坚实的基础。

系统环境构建

虚拟维修环境的构建，无疑是虚拟维修系统的核心环节。为了营造出一个既真实又富有交互性的维修场景，需要运用三维建模与渲染技术。

在建模阶段，严格依据航空发动机附件的实际物理特性和设计参数，进行精细的三维模型创建，这不仅涉及每一个附件的精确尺寸和形状，更包括其内部的复杂结构和零部件的相互关系，每一个细节，都力求达到与真实物体无异的精准度。

在渲染方面，运用多种高级技术来提升模型的视觉真实感，通过精细的纹理贴图，赋予了模型逼真的表面质感和细节表现；同时，借助先进的光照和阴影技术，模拟真实世界中的光线变化和阴影投射，使得虚拟维修环境中的每一个物体都呈现出极为真实的视觉效果。

但与此同时，一个完整的虚拟维修环境不仅包含静态的三维模型，为了让维修人员能够在虚拟环境中进行真实的操作，需要设计各种虚拟维修工具和设备，这些工具和设备不仅外观逼真，而且功能齐全，能够完全模拟真实的维修操作流程。

除此之外，还需要进行虚拟维修场景的整体构建，地面、墙壁、灯光等环境元素都被精心设计和渲染，以营造出真实的维修工作氛围。

交互设计与实现

在航空发动机附件虚拟维修系统中，交互设计的优劣直接影响用户的使用体验和维修效率，因此，



图4 系统架构示意

在交互设计与实现方面投入了大量的精力，力求打造一款用户友好、操作便捷的虚拟维修系统。

在用户操作界面设计方面，需要遵循简洁明了、易于操作的原则。通过设计的界面布局和直观的图标展示，用户能够迅速了解系统的各项功能，并轻松地进行操作，同时，还需要提供详细的用户手册和操作指南，以帮助用户更好地掌握系统的使用方法。

在工具使用设计方面，需要考虑用户的操作习惯和思维方式。虚拟维修系统中的工具种类繁多，每种工具都有其特定的使用方法和操作流程，为了确保用户能够准确地进行虚拟维修操作，对每种工具的使用进行了详细的设计，并提供了相应的操作提示和引导。此外，还需要支持用户根据自身的使用习惯进行自定义设置，以进一步提高操作的便捷性和准确性。

手势识别和语音识别技术可以用来实现上述的交互设计。通过手势识别技术，用户可以通过简单的手势动作来控制虚拟维修系统中的各种工具和设备，无需繁琐的键盘或鼠标操作；而语音识别技术则允许用户通过语音指令来与系统进行交互，更加符合人类的自然交流方式，这些先进技术的应用极大地提高了用户与系统的交互效率和体验。

数据管理与可视化

在航空发动机附件虚拟维修系统中，数据管理与可视化技术发挥着至关重要的作用。由于维修过程中会涉及大量的数据和信息，如何高效地管理和直观地展示这些数据，成为提升系统实用性和用户体验的关键。

数据管理技术的运用，主要在于确保数据的完整性、安全性和易访问性。采用关系型数据库（如MySQL或Oracle）可以有效地组织和存储结构化的数据，如维修记录、用户信息等。这类数据库通过表格的形式来存储数据，利用SQL语言进行查询和操作，使得数据的检索和更新变得高效且准确。而对于非结构化的数据，如三维模型数据、维修场景的图像和视频等，非关系型数据库（如MongoDB或Cassandra）则提供了更为灵活的存储方案。

仅仅依靠数据库技术并不足以满足虚拟维修系统的全部需求。数据的可视化也是极为重要的一环，能够将抽象的数据转化为直观的图形或图像，帮助用户更好地理解和分析数据，在虚拟维修系统中，三维可视化技术被广泛应用。通过创建三维的图形界面，用户可以更直观地观察和理解航空发动机附件的结构和工作原理。同时，这种技术还能够模拟维修过程中的各种操作，使用户能够在虚拟环境中进行实战演练。

除了三维可视化之外，二维可视化技术也在系统中发挥着重要作用。例如，通过生成各种图表和报告，二维可视化技术能够帮助用户分析和比较不同时间段或不同条件下的维修数据，从而找出可能存在的问题和改进方案。

在实现数据管理和可视化的过程中，需要充分考虑数据的结构、大小和格式等因素。不同的数据类型可能需要采用不同的存储和展示方式，以确保数据的可读性和易用性，同时，还需要关注系统的性能和稳定性，避免因数据量过大而导致

致的系统卡顿或崩溃等问题。

结束语

随着航空工业的快速发展，传统航空发动机附件维修方式已难以满足现代维修需求。虚拟维修技术的引入，为这一领域带来了新的变革。通过综合运用虚拟现实、增强现实及三维建模与仿真技术，可以构建航空发动机附件虚拟维修系统，该系统具备高度逼真的虚拟环境和丰富的交互功能，一定程度上可以提高维修效率和准确性。未来，随着技术的不断发展，虚拟维修技术将在航空维修领域发挥更大作用。

航空动力

（黄湘龙，中国航发湖南动力机械研究所，高级工程师，主要从事航空装备服务保障技术研究）

参考文献

- [1] 张青,赵洪利,郭庆,等.基于3DVIA Studio的民航发动机虚拟装配实验系统设计与开发[J].制造业自动化,2015,37(7):40-44.
- [2] 刘超,田巨,薛建海.飞机维修类专业虚拟仿真实训中心的建设[J].新疆职业大学学报,2022,30(1):75-80.
- [3] 段红艳,王建锋.后疫情时代虚拟现实技术在《汽车底盘构造与维修》实训教学中的应用[J].时代汽车,2022,(15):45-47.
- [4] NASRFARD F,MOHAMMADI M,KARIMI M.A petri net model for optimization of inspection and preventive maintenance rates[J].Electric Power Systems Research,2023,216:109003.
- [5] 赵新灿,左洪福,徐兴民.增强现实维修诱导系统关键技术研究[J].中国机械工程,2008,(6):678-682.