

航空维修教学用飞机部件拆装试验台开发与实践

王雪娇

北京科技职业大学航空工程学院, 北京 100176

DOI: 10.61369/SDME.2025020016

摘要：针对航空器维修执照培训中拆装技能训练存在的模块化不足、综合实践性弱等问题，设计了一种集成虚实融合技术的多功能综合技能训练台。通过模块化机械结构设计、AR/VR交互系统开发及智能评估算法构建，实现了对飞机部件拆装全流程的仿真模拟。经实验验证，该训练台可将学生工具选择正确率提升至93%，综合操作效率提高41.3%，显著优于传统单一训练设备，并已通过多家航司企业的应验证。

关键词：航空维修教育；虚实融合；模块化设计；智能评估

Development and Practice of Aircraft Component Disassembly Test bench for Aviation Maintenance Teaching

Wang Xuejiao

School of Aeronautical Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100176

Abstract：Aiming at the lack of modularity and weak comprehensive practice of disassembly skills training in aircraft maintenance license training, a multifunctional comprehensive skills training table with virtual-real integration technology was designed. Through the design of modular mechanical structure, the development of AR/VR interactive system and the construction of intelligent evaluation algorithm, the simulation of the whole process of aircraft parts disassembly is realized. Through experimental verification, the training table can improve the student tool selection accuracy to 93%, the comprehensive operation efficiency increased by 41.3%, significantly better than the traditional single training equipment, and has passed a number of aviation enterprises should be verified.

Keywords：aviation maintenance education; Virtual-real fusion; Modular design; Intelligent evaluation

一、行业需求分析

截至2023年，中国民航现役飞机约为4132架，如此大规模机队对飞机维修安全提出了极高要求。但是，目前持有中国民用航空局办法的航空器维修人员照的维修人员仅有6.7万人，行业的缺口非常明显。按照当前的发展速度，未来20年，飞机维修行业大约需要新增13.8万从业人员，才能满足行业快速发展带来的维修需求。同时，培训效率偏低，传统的教学方式难以满足复杂的飞机维修技术需求，导致人才培养速度远远与行业需求增长的速度极度不匹配。在这样的背景下，飞机维修领域需要开发新培训手段，引入先进的虚拟现实、增强现实等技术，开发更加高效、精准的培训课程体系，来缩短培养周期，提高培训质量，为行业输送更多维修人员，保障民航飞行安全与效率^[1]。

二、教学痛点

当前高校再航空维修教学面临多重痛点。首先，设备老旧难用，77%的院校设备使用超7年，难以保障在校生的协同训练，影响了学生培养综合实操能力。其次，训练模式存在单一，单项

训练占比高达80%，与CAAC的147培训标准相差较大，导致学生毕业后难以适应实际工作需求。同时，教师再教学还面临师资力量不足、教学资源匮乏且更新缓慢等问题，难以匹配当今民航事业的快速发展。综合以上问题，为提高航空维修人才的培养质量，需通过创新教学手段和优化教学资源来改善^[2]。

三、技术趋势

虚拟仿真：某航《飞机大部件装配虚拟仿真实验》证实，通过借助VR训练可使维修人员的实际操作失误率降低三分之一。

智能评估：基于DTW算法的动作匹配技术已在波音系列飞机的维修培训中应用，评估准确率在90%以上。

四、系统设计与实现

(一) 总体技术路线图

图1展示了系统的技术实现路径，涵盖“需求分析-模块设计-虚实交互-评估优化”四大阶段：

需求分析：结合CCAR-66R3航空器维修人员执照培训标准

与航司工作单卡的要求，设定了8个应用型维修场景（如紧固件拆装、管路密封检测）。

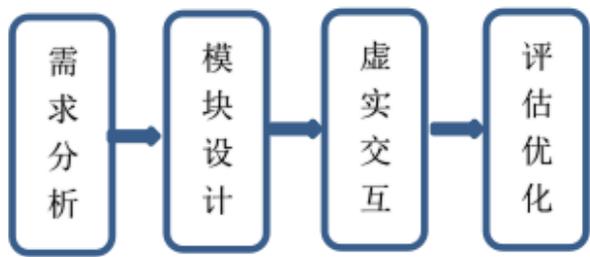


图1 技术路径

模块设计：采用“积木式”组合结构，通过标准化接口（SAE AS85049）实现功能模块快速重构。

虚实交互：基于 CFM56-5B 引擎开发 AR/VR 双模式训练系统，支持虚实操作同步映射。

评估优化：集成多模态数据融合算法，实现操作过程全维度量化评价。

（二）关键技术

1. 模块化训练单元

为满足不同类型的航空装配训练需求，开发了3类可互换功能模块，如表1所示：

表1

模块类型	训练内容	工具种类
紧固件拆装	螺栓 / 铆钉操作	扭矩扳手等 12 种
管路施工	液压管路连接	弯管器等 8 种
线缆敷设	航空导线处理	压接钳等 6 种

采用统一装配接口的快换结构，该结构使模块更换时间缩短到 30 秒以内，能够提高训练效率，方便快速切换不同训练模块，增加训练内容的多样化，同时提高了灵活性和实用性。

2. 虚实交互系统

AR 指引：借助 HoloLens2 设备，能够将工具选择提示等虚拟信息清晰地显示在操作人员的视野中，为操作人员提供精准的指引。同时，系统具备强大的错误操作实时标注功能，一旦操作人员出现错误操作，系统会立即通过视觉或听觉等方式进行提醒，帮助操作人员及时纠正错误，提高操作的准确性。

力反馈模拟：配备高精度的六维力觉装置，能够实现 0.1N·m 精度的力反馈，精准模拟真实装配过程中的阻力，让操作人员在虚拟环境中也能感受到与真实操作相似的力反馈效果，增强操作的真实感和沉浸感，有效提升操作人员的装配技能。

3. 智能评估算法

开发了基于 DTW-LSTM 的混合模型，用于对操作人员的训练表现进行综合评估。评估公式如下：

$$\text{Score} = 0.6 \times S_{\text{sequence}} + 0.3 \times S_{\text{force}} + 0.1 \times S_{\text{time}}$$

其中，动作序列匹配度 S_{sequence} 通过动态时间规整（DTW）算法计算得出，能够有效评估操作人员的动作顺序是否符合标准流程；力反馈匹配度 S_{force} 反映操作过程中施加的力度是否准确；时间匹配度 S_{time} 则衡量操作完成的时间是否合理。通过综合考虑这三个因素，该智能评估算法能够全面、客观地评估操作人员的训练表现，为后续的训练改进提供科学依据。

五、教学实践验证

（一）实验设计

为了验证本系统在航空发动机装配训练中的教学效果，设计了如下实验：

对象：选取某航院 2024 级学生 120 人，随机分为实验组和对照组，每组各 60 人。

科目：CFM56 发动机风扇叶片拆装^[10]。该科目是航空维修专业的重要课程，对学生的操作技能和规范性要求较高，具有很强的代表性和实用性^[3-4]。

指标：从工具选择正确率、操作规范度和任务完成时间三个关键维度进行评估，全面衡量学生的学习效果和技能掌握程度³。

（二）实验结果

表2

评估项	实验组	对照组	提升率
工具正确率	93%	71%	31.0%
规范度得分	4.5/5	3.2/5	40.6%
平均耗时	42min	65min	35.4%

从实验结果可以看出，实验组在各项指标上均显著优于对照组。工具选择正确率从 71% 提升至 93%，规范度得分从 3.2/5 提升至 4.5/5，平均耗时从 65 分钟缩短至 42 分钟，提升效果显著。

（三）效果分析

学习效率提高：通过眼动仪数据监测发现，AR 指引系统能够有效降低学生的认知负荷。实验组学生在训练过程中，视觉搜索时间减少了 58%。这表明 AR 指引能够精准地将关键信息呈现给学生，减少了他们在寻找工具、理解操作步骤等过程中的视觉搜索时间，使学生能够更加专注于操作本身，从而提高了学习效率和质量。

举一反三能力增强：为了评估学生技能的长期保持和迁移能力，在实验结束后 1 个月进行了复测。结果显示，实验组的技能保留度达到了 89%，而对照组仅为 62%。这表明本系统不仅能够帮助学生在短期内快速掌握操作技能，还能有效促进技能的长期保持和迁移，使学生在未来的学习和工作中能够更好地应用所学知识和技能。

六、创新应用价值

(一) 教育模式创新

分层训练体系：本系统创新性地构建了分层训练体系，设置了基础、高阶和竞赛三级难度，能够满足不同层次学生的学习需求，支持个性化培养。基础模块为学生提供扎实的理论知识和基本操作技能训练，高阶模块引入复杂场景和更高精度要求的操作任务，竞赛模块则模拟真实技能大赛环境，激发学生的学习兴趣 and 竞争意识，全面提升学生的综合能力。

故障融入教学：针对航空维修中常见的装配故障，系统开发了故障融入教学课程，能够模拟 12 类常见的典型装配故障，如螺紋咬死、密封圈错位等^[5]。通过在训练过程中随机融入故障，引导学生主动发现问题、分析原因并解决问题，培养学生的故障诊断和应急处理能力，使学生在面对真实工作场景中的故障时能够更加从容应对。

(二) 产业协同发展

课证融通：为加强教育与产业的紧密结合，本系统对接 CCAR66R3 标准，开发了认证模块，实现了课程与职业认证的有机融合。

产教融合：与商飞等知名企业深度合作，共同开发了 C919 起落架拆装训练课程。该课程紧密结合企业实际需求，将企业的先进技术和工艺融入教学内容，使学生能够提前了解和掌握行业前沿知识和技能，缩短学生从学校到企业的过渡期，为企业输送高素质、适应性强的航空维修人才，推动产教融合向纵深发展^[6]。

(三) 经济效益

成本节约：本系统采用模块化设计，单台设备可替代 5 类传统实训装置，大大减少了设备采购种类和数量^[9]。通过优化设备功能和整合资源，采购成本降低了 60%，为院校和企业节约了大量资金，提高了资源利用效率，具有显著的经济效益。

耗材节省：借助虚拟训练功能，学生可以在虚拟环境中进行多次重复操作训练，减少了对实体部件的损耗。与传统实训方式相比，实体部件损耗率从 7.3% 降至 0.8%，大幅降低了耗材成本，同时也减少了因部件损坏导致的维修和更换工作，进一步降低了运营成本，为院校和企业带来了可观的经济效益。

七、结论与展望

本研究构建的智能训练平台，通过创新的教育模式、产业协同发展以及显著的经济效益，有效解决了航空维修教育中“技能培养碎片化”的难题^[7]。系统采用分层训练体系和故障融入教学，满足了不同层次学生的学习需求，培养了学生的综合能力；对接行业标准和企业需求，实现了课证融通和产教融合，提高了学生的就业竞争力；同时，通过模块化设计和虚拟训练功能，降低了设备采购成本和耗材损耗，具有显著的经济效益。

此外，还将探索基于数字孪生的预测性维护训练模块，模拟设备故障预测和预防性维护过程，为学生提供更前沿的训练内容，推动航空维修教育向智能化、数字化方向发展^[8]。

参考文献

- [1] 贾丽岩, 吴磊. 国内民航维修企业及航空公司维修能力一览(上)[J]. 航空维修与工程, 2009, (03): 74-79. DOI: 10.19302/j.cnki.1672-0989.2009.03.030.
- [2] 马晓天, 张惠. 基于市域产教联合体的高职院校人才培养模式创新研究与实践[J]. 职业教育, 2024, 23(26): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4530.2024.26.004.
- [3] 曹增义, 单继东, 王昭阳, 等. 面向航空发动机制造的数字孪生应用架构探索与实践[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 40-49. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.040.
- [4] 杨琴. “双高”背景下航空类高水平专业群课程思政教学模式研究[J]. 产业与科技论坛, 2024, 23(24): 164-166.
- [5] 肖久林, 凌云霞, 彭中亚, 等. 航空装备修理技术标准体系研究[J]. 航空标准化与质量, 2017(5): 4. DOI: 10.13237/j.cnki.asq.2017.05.005.
- [6] 吕亚楠. 1+X 证书制度与飞机电子设备维修专业人才培养方案的融合性研究[J]. 现代职业教育, 2023(1): 93-96.
- [7] 齐瑞福. 广州临空经济区创新链、产业链与价值链协同发展路径研究[J]. 商场现代化, 2024, (17): 186-188. DOI: 10.14013/j.cnki.scxhdh.2024.17.038.
- [8] 威浩, 李晓月, 陶强, 等. 数字孪生驱动的机械工艺系统研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 32-64.
- [9] 吴冬. 民航飞机液压管路故障检修系统优化设计[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(5): 63-66.
- [10] 杨军, 朱江, 蔡志军. 航空发动机反推测控系统的设计[J]. 机械与液压, 2018, 046(021): 127-131, 135.