

文章编号: 1674-8190(2025)02-168-07

民用飞机维修程序AR虚拟验证可行性探索分析

孙宏丽¹, 王宏朝¹, 张雅杰¹, 乔万鑫¹, 赵新灿²

(1. 上海飞机客户服务有限公司 技术出版物部, 上海 200241)

(2. 郑州大学 计算机与人工智能学院, 郑州 450001)

摘要: 民用飞机手册验证工作的难点在于验证资源的保障, 亟需开发新的验证途径, 以实现手册高效率、低成本验证。提出一种除书面验证和操作验证方法外, 基于数模的维修程序AR虚拟验证方法。从飞机维修手册验证技术要求出发, 给出维修程序AR虚拟验证工作流程, 并从构建与真实构型飞机一致性和维修操作一致性的角度探索该方法的可行性; 通过将操作验证和AR虚拟验证实施要求进行比对, 证明拆装类和检查类维修程序采用AR虚拟验证方法具有工程可实施性。

关键词: 维修程序; 手册验证; 增强现实; 虚拟验证; 书面验证; 操作验证

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.02.19

Feasibility exploration analysis of AR virtual verification method of civil aircraft maintenance program

SUN Hongli¹, WANG Hongchao¹, ZHANG Yajie¹, QIAO Wanxin¹, ZHAO Xincan²

(1. Technical Publications Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. College of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The difficulty of verifying civil aircraft manuals lies in the guarantee of verification resources, and there is an urgent need to develop new verification methods to achieve efficient and low-cost manual verification. An augmented reality (AR) virtual verification method based on digital model is proposed in addition to table-top verification and on-object verification methods. This paper gives the workflow of maintenance program AR virtual verification based on the technical requirements of aircraft maintenance manual verification, and explores the feasibility of this method from the perspective of building consistency with real configuration aircraft and maintenance operation consistency. Comparing the implementation requirements of on-object verification and AR virtual verification, it is demonstrated that the AR virtual verification method is feasible for the disassembly and inspection maintenance procedures.

Key words: maintenance program; manual verification; augmented reality; virtual verification; table-top verification; on-object verification

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-02-22

通信作者: 孙宏丽(1982-), 女, 博士, 正高级工程师。E-mail: sunhongli-12345@163.com

引用格式: 孙宏丽, 王宏朝, 张雅杰, 等. 民用飞机维修程序AR虚拟验证可行性探索分析[J]. 航空工程进展, 2025, 16(2): 168-174.

SUN Hongli, WANG Hongchao, ZHANG Yajie, et al. Feasibility exploration analysis of AR virtual verification method of civil aircraft maintenance program[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(2): 168-174. (in Chinese)

0 引言

考虑航空器使用的正确性和安全性,国际民用航空组织(ICAO)、欧美民用航空管理机构(如FAA、EASA)等都制定了大量的持续适航规章条款和文件。为了使飞机维修程序更高效、更安全地被执行,航空领域非常重视手册验证工作,目的是确保维修程序内容的完整性、协调性、准确性、可操作性和现行有效性^[1-4]。美国联邦航空管理局(FAA)指出技术出版物质量是运营人和制造商关注的重要因素^[5-7]。国外飞机主制造商在技术出版物研制过程中更重视维修程序的验证^[8]。欧洲航空航天与防务工业协会(ASD)发布的S1000D标准^[9]提出书面验证(Table-top Verification)和操作验证(On-object Verification)两种核心验证方法^[5,10-12]。

国内民用飞机主制造商和相关研究机构积极开展手册验证技术研究。在操作验证方法的基础上,提出评估/模拟验证方法及其四类子方法^[5],并在总装、部装和试飞阶段进行了大量的维修程序验证工作^[1-4],总结出维修程序验证的经验和方法。但民用飞机手册验证工作的难点在于验证资源的保障。具体体现在:手册验证时机具有突发性,如某民用飞机型号试飞改装期间,由于地理位置、时间上的不便利,错过部分夜间加装的内饰部件的验证;由于供应商授权等资质原因,几乎所有的子航线可更换单元(LRU)件试飞期间均无法拆装以进行验证,如客舱座椅上的USB口拆装程序;手册编写计划与总装进度不匹配,如货舱门作动器拆装编写进度靠后,现场加装时程序尚未发布;还有航耗材、GSE(Ground Support Equipment)供应不及时的情况,例如空气循环机安装时需要用到一些特殊耗材,但其存在采购周期长、变数很大等问题。

如何争取手册验证各类验证资源,选择合适的验证时机,保证验证效果,避免交付客户后因维修程序质量问题带来高昂的维修成本和潜在的维修差错代价,是当前国产民用飞机主制造商面临的难题。因此亟需开发新的验证途径,以实现手册高效率、低成本地验证。

飞机维修手册(Aircraft Maintenance Manual, AMM)是最重要的一类持续适航文件,也是维修程序中被使用率最高的。其中,飞机维修AMM手册拆装程序占手册比例50%以上,检查程序占手册比例30%以上。本文以AMM手册拆装类和检查类维修程序为研究对象,探索如何保证真实维

修环境和虚拟维修环境的一致性,通过操作验证和AR虚拟验证实施准备、验证要求和验证结论的比对进行AR虚拟验证方法可行性验证,探索维修程序的增强现实(Augmented Reality, AR)虚拟验证技术。

1 飞机维修手册(AMM)验证技术要求

交付给客户的AMM手册需通过验证^[5]。通常分为书面验证和操作验证。交付客户前的维修程序,要尽早安排验证。经过审核的AMM数据模块DM(Date Module),可进行验证。

书面验证需提供的验证文档包括设计图纸、文件、MSG-3分析文件等相关批准的源文件,供验证过程使用。

操作验证在验证资源保障准备到位,确认不影响安全的情况下,由验证人员进行操作。实际验证操作前应检查维修程序的适用性与飞机构型一致。如有差异,需评估构型偏离对验证充分性的影响。

检查要求主要检查手册内容信息要点,参引文件链接、程序与插图内容、技术数据是否正确。

2 AR技术的引入

AR技术是智能制造领域应用较为广泛的技术,随着计算机图形学图像配准、虚实结合的三维注册技术、多传感器数据融合与人机交互和人工智能技术的发展,AR维修辅助技术可以应用于飞机维修领域。它不只是可移动穿戴式硬件设备,更集成了图像识别、手势识别和语音识别等功能,是支持数据交互、云端交互来实现强大功能的技术。

维修程序的AR虚拟验证方法,可实现对维修程序接近过程的评估,操作步骤主动引导,查看隐藏在飞机内部系统件、传力系统部件的交联关系以及设备运行原理等,还可以评估维修操作空间的合理性、使用工具是否便利等问题。

3 维修程序AR虚拟验证可行性分析

针对国内某民用飞机,围绕基于数模的维修程序AR验证试验技术核心问题,将飞机维修手册、虚拟维修和AR技术相结合,从验证系统构建理论、虚实融合显示方法、自然交互设计出发,探讨AR虚拟验证平台搭建与使用。实施工作流程如图1所示。

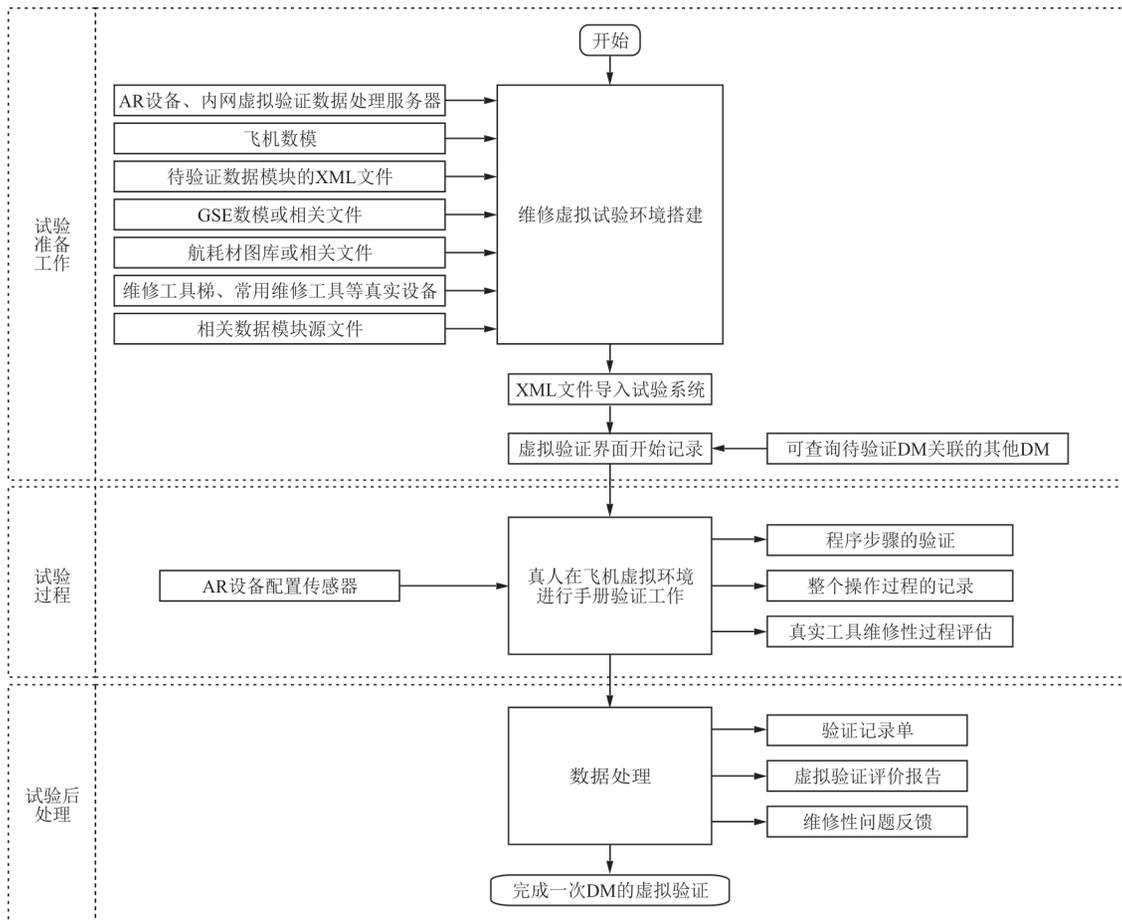


图1 维修程序AR虚拟验证实施流程图

Fig. 1 AR virtual verification implementation flow chart of maintenance procedure

维修程序AR虚拟验证可行性分析主要考虑以下5方面内容。

3.1 真实和虚拟空间的碰撞检测技术

现有AR硬件设备自带手势识别算法,可定位视野中的虚拟物体的三维坐标。真实空间中人手的绝对坐标可通过摄像头捕获,并计算投射到虚拟空间中。这样,真实空间和虚拟空间的坐标可由计算机获取并进行追踪计算,实时检查真实和虚拟空间的物体碰撞、以及虚拟和虚拟空间的物体碰撞。

已有大量手势追踪和虚拟空间显示模拟人手技术^[13]的研究,结合碰撞检测技术^[14-15],可构建虚拟维修环境与真实飞机操作空间一致的效果,进而评估虚拟维修飞机的可操作性。

3.2 构造与真实构型飞机维修性的一致性

航线的维修性,是指飞机在规定的条件下和规定的时间内,按规定程序和方法进行维修时,保

持或恢复到规定状态的能力^[16]。构造与真实构型飞机维修环境一致性,虚拟维修环境主要考虑以下6点:

1) 航线可维护件在虚拟空间中可进行拆卸、安装等虚拟操作。

2) 飞机上铆钉紧固件连接的零部件,不可进行虚拟操作,包括实心铆钉、抽芯铆钉。

3) 飞机紧固件中的螺栓、螺钉、螺母、垫圈可以进行虚拟操作;环槽钉、销轴、镶嵌件、高锁螺母、钉套、调整螺母组件,如进行虚拟操作,需给出特殊的信息提示并确认。

4) 有特殊运动要求的GSE或零部件,要给出特殊运动的提示信息 and 定义。限位运行零部件,给出限位的提示信息 and 定义。

5) 虚拟空间与真实空间物体碰撞、干涉时,给出提示信息。

6) 真实GSE或操作工具在虚拟维修环境下使用时,虚拟场景中显示与空间位置相关的提示状态。

3.3 维修程序 AR 虚拟验证其他要求

基于数模的虚拟维修环境,当遇到维修程序中没有可以操作显示的虚拟物体情况,操作人员通过核对源数据方式进行评估。信息包括:

1) 断路器,阶差、间隙、R角要求,电源、液压、静电安全预防,某些关键部件的密封信息、粘接信息,两零部件间距离要求,截面长度要求,拆装程序涉及的参引功能试验步骤,确认位置、数值范围、颜色、显示等,检查、标记、排水、清洁等。

2) 驾驶舱控件位置,动力装置操作安全,如有数模,采用数模虚拟操作显示,也可采用图片。

3) 密封件拉伸预紧,某件沿着另外一个件滑移;如有数模采用虚拟操作显示。

4) 保护措施,可采用数模显示。

3.4 虚拟维修场景的制作与显示

3.4.1 基于 S1000D 维修程序 AR 快速制作研究

将飞机三维数模导入某国产自研软件,实现结构树的读取与分层,数模的层级定义与系统码的生成,文字热点的编制和文字标签,关键视角的定义,典型动画的生成,全局坐标系和局部坐标系之间的转换,常用维修工具的使用,辅助模型的导入导出,仿真动画的显示与调整等功能。

1) 基于 S1000D 标准实现三维产品模型管理和转换。

2) 实现维修任务中的拆装程序、检查程序的虚拟场景自动化制作。

3) 实现 DDN 包解析的技术出版物 XML 文件读取显示。

4) 实现关键部件信息的文字热点制作。

5) 实现 1:1 数模自然坐标下的显示,可以按照比例调整虚拟场景模型,并给出单位设置。

3.4.2 维修程序 AR 虚拟验证系统虚拟场景显示

维修程序 AR 虚拟验证系统虚拟场景显示,包括以下内容:

1) 维修程序虚拟验证场景界面的设计。

2) 维修程序在 AR 头盔端的显示。

3) 维修程序辅助资料显示,包括相应源数据等的调取显示。

4) 维修程序警告、警戒、注的语音播报。

5) 维修程序某些影响安全操作的虚拟提示。

6) 实时构造虚拟手,作为机务真实手姿态在虚拟空间的映射。

7) 实现三维数模可操作属性的定义,赋予虚

拟空间数据的再次编辑功能。

8) 实现维修程序虚拟验证系统与现行数据管理系统数据传输,DM 在 AR 可穿戴设备中的调用、读取与控制操作。

9) AR 虚实配准、融合和交互操作研究。

3.5 维修程序 AR 虚拟验证技术实现及效果

搭建 AR 虚拟维修环境,自研基于 S1000D 标准的三维图形软件绘制软件,集成 AR 数据转换功能,开发功能兼顾 3.4.1 节、3.4.2 节要求。根据飞机维修程序和真实飞机制造特点开发 3.1 节、3.2 节、3.3 节,满足维修程序虚拟环境搭建的技术要求。

某维修程序 AR 制作步骤:

1) 某维修程序区域数模和背景数模的加载;

2) 数模按章节、区域重新分类管理;

3) XML 文件的导入;

4) 虚拟 GSE 部件运动限位的设置;

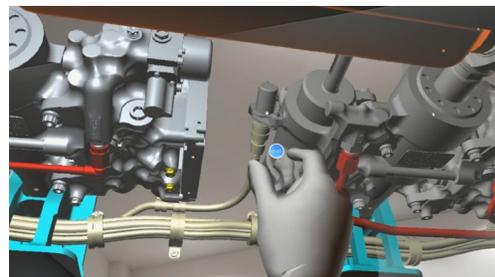
5) 连网,相关资料查询网站登录;

6) AR 端数据发布。

该维修程序 AR 虚拟验证过程参见实施流程图(如图 1 所示)。目前虚拟验证操作界面包括显示界面和虚拟维修环境界面,如图 2 所示。维修程序显示界面可以查看 AMM 维修程序关联的飞机图解零件目录(AIPC)、无损检测(NDT)手册内容,相关的原理图和计算机图形元文件格式(CGM)、图片和视频等。操作者可用语音或者手势控制进度。



(a) 显示界面



(b) 虚拟维修界面

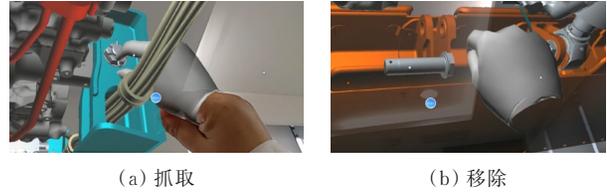
图 2 维修程序 AR 虚拟融合显示

Fig. 2 AR fusion display of maintenance program

某机型副翼作动器拆卸程序的虚拟验证实例如图 3 所示。此实例中尚未涉及碰撞算法等,通过 AR 设备摄像头拍摄到操作人员人手,进行定位,特征提取重塑虚拟空间的人手。虚拟空间人手随着操作人员真实手动动作,为了比较明显,在图 3 中设置真实人和虚拟人的坐标偏差较大。虚拟操作过程中发现:

- 1) 操作人员根据虚拟维修环境的空间位置,调整自身姿态,可以进行维修程序的验证评估工作;
- 2) 与真实飞机操作空间相比约束性小,虽有碰撞提示,但操作人员活动不拘束;
- 3) 操作过程不用担心损伤飞机部件表面;
- 4) 可对维修程序拆装、检查步骤进行验证;
- 5) 对人手定位要求很高,操作精细度高,当虚拟零部件被人手触碰到时,可被人手带动;

- 6) 拆装逻辑是否合理更依据操作人员经验;
- 7) 虚拟验证更节约成本和验证时间。



(a) 抓取 (b) 移除

图 3 人手抓取虚拟零部件及移除效果

Fig. 3 Human grabbing of virtual parts and removal effect

4 AR 虚拟验证与操作验证方法比对

虚拟验证与操作验证方法从实施准备、验证检查要求和验证结论角度进行比对,如表 1~表 3 所示。

表 1 AR 虚拟验证与操作验证实施准备比对表

Table 1 AR virtual verification and on-object verification implementation preparation comparison table

实施准备条件	操作验证	AR 虚拟验证
DM 草稿完备性	完成 DM 定稿的草稿	完成 DM 定稿的草稿
工具设备、耗材、GSE 资源保障	确认有可用的工具设备、消耗品、消耗性零件、GSE 资源	确认有该构型飞机的工具设备、消耗品、消耗性零件、GSE 信息的源数据文件
检查程序	应由设计人员完成合理性和安全性评估	应由设计人员提供合理性和安全性分析报告
分析验证工作是否影响飞机/发动机/部件安全	在确认不影响安全的情况下,由验证人员严格按照工卡内容进行操作	无需考虑
构型一致性	需检查 DM 适用性与验证实物构型是否一致性	需核实 DM 适用性与虚拟维修飞机构型是否一致性

表 2 AR 虚拟验证与操作验证检查要求比对表

Table 2 AR virtual verification and on-object verification check requirements comparison table

检查要求	操作验证	AR 虚拟验证
工具和设备	可使用	与源数据文件一致
区域信息	确认工作相关的区域都进行了标识,无遗漏、无多余,DM 中区域信息准确	与区域文件一致,确认无遗漏、无多余区域
检修口盖	确认所有检修口盖均列出,无遗漏、无多余,打开口盖可接近并开展维修任务	确认所有检修口盖均列出,无遗漏、无多余,打开口盖可接近并开展维修任务
断路器	确认断路器信息准确、无遗漏、无多余	与源数据文件一致
警告、警戒信息	在执行可能伤害维修人员或损伤飞机/发动机/部件的步骤前,应确认维修程序中均有明确的警告、警戒信息,且标明保证人员和飞机/发动机/部件安全的所有要求	分析警告、警戒信息合理性
维修程序步骤	核实维修程序步骤完整且逻辑顺序合理	核实维修程序步骤完整且逻辑顺序合理
技术插图	核实插图是否与飞机/部件实际构型一致	核实插图是否与虚拟飞机/部件构型一致
恢复工作	确认维修程序完成后有完整的恢复工作,可使飞机/部件恢复至正常状态	确认维修程序完成后有完整的恢复工作,可使飞机/部件恢复至正常状态

表 3 AR 虚拟验证与操作验证验证结论对比表
Table 3 AR virtual verification and on-object verification conclusion comparison table

验证结论	操作验证	AR 虚拟验证
通过	DM 内容应正确完整、满足使用和维修目的、可被准确理解、具备可操作性和使用安全性	DM 内容应正确完整、满足使用和维修目的、可被准确理解、具备可操作性和使用安全性
修改后通过	a) 内容主体逻辑正确、可理解,存在少量步骤关系错误、信息缺失或者不准确,部分语言有一定的歧义; b) 不影响主体内容的较大修订,主要是信息的补充、语言的完善和少量的步骤调整等	评估信息点存在问题、但问题的纠正清晰,虚拟验证人员可以直接判断并给出明确要求
不通过	程序逻辑存在重大问题,按照评估结果修订后需要重新安排验证,重新验证可按需验证修订部分	程序逻辑存在重大问题,发现评估信息点存在的问题纠正无法准确判断

4.1 实施准备

AR 虚拟验证无法提供真实工具设备、耗材、GSE 时,采用核实源数据方式对维修步骤进行评判。虚拟验证无需考虑实操工装、环境等对飞机的安全性影响和人员操作的安全性。虚拟验证适用于成熟度较高的 DM。

4.2 检查要求

AR 虚拟验证通过核实源数据方式,解决没有真实工具设备、无断路器开关逻辑判断等操作问题。针对检查步骤和拆装步骤两种验证方法都具有对程序逻辑判别的直接性。虚拟验证对接近关系更易判别,具有成本低、节省验证时间、对飞机维修安全性影响要求低等优势,虚拟验证同样可以反向指导飞机维修性设计。

4.3 验证结论

虚拟验证更要借助于操作人员的经验,来判断步骤是否具有可操作性、维修性。对虚拟操作人员能力有更高要求,对手册内容具备清晰的问题纠错判断。

综上所述,虚拟验证可以达到对手册内容技术信息点、程序逻辑、接近过程、构型一致性检查验证的目的。

5 结 论

1) 在总结书面验证和操作验证这两种验证技术要求的基础上,结合 AR 技术提出维修程序 AR 虚拟验证的实施流程,该实施过程可被执行。

2) 搭建虚拟验证平台需要研究碰撞检测技术,构造与真实构型飞机维修一致性的约束条件,

维修程序 AR 操作待需要考虑解决的问题,以及虚拟场景的制作与显示开发。

3) 本文给出了维修程序 AR 虚拟验证技术实现过程并得到了初步的效果。发现虚拟操作人员可更轻松地进行评估工作,对飞机维修和人员操作安全性影响要求更低,但对虚拟操作定位要求高,操作人员必须是具备一定授权和资历的人员;虚拟验证节约成本和验证时间。

4) 虚拟验证更适合验证程序的接近步骤,降低了飞机维修和人员的安全性风险,适用于成熟度较高的 DM 使用;对检查步骤和拆装步骤具有程序逻辑判别的直接性,但测试类程序不适用;虚拟操作具备对手册内容评估信息点有清晰的问题纠错判断能力。借鉴书面验证技术,很多信息点需要通过核实源数据方式进行,要求 AR 设备可以浏览查阅源数据文件,该过程需要手册编写人员协助。

参 考 文 献

- [1] 孙宏丽,王清森,马文帅,等.襟翼高升力系统和结构部件飞机维修手册程序验证研究[J].航空工程进展,2021,12(5):80-86.
SUN Hongli, WANG Qingmiao, MA Wenshuai, et al. Study on program verification of aircraft maintenance manual for flaps high-lift system and structural components[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 80-86. (in Chinese)
- [2] 马思宁.飞机维修手册验证的研究[J].航空维修与工程,2015(9):93-95.
MA Sining. Research on aircraft maintenance manual validation[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(9): 93-95. (in Chinese)
- [3] 张晓刚.民机维修手册试飞阶段验证方法[J].中国科技信息,2019(17):83-84,87.
ZHANG Xiaogang. Verification method of civil aircraft

- maintenance manual in flight test phase [J]. *China Science and Technology Information*, 2019(17): 83-84,87. (in Chinese)
- [4] 郭强强, 唐晶. 民用飞机维修手册操作验证质量管理 [C]// 2017年(第三届)中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2017: 137-140.
GUO Qiangqiang, TANG Jing. Quality management of aircraft maintenance manual operating verification [C]// 2017 (3rd) China Aviation Science and Technology Conference. Beijing: CSAA, 2017: 137-140. (in Chinese)
- [5] 张雅杰, 曾庆林, 王宏朝, 等. 民用飞机维修手册验证方法研究 [J]. *航空工程进展*, 2021, 12(5): 35-41.
ZHANG Yajie, ZENG Qinglin, WANG Hongchao, et al. Research on verification method of civil aircraft maintenance manual [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(5): 35-41. (in Chinese)
- [6] ASD. International specification for technical publication utilizing a common source database S1000D [S]. US: ASD, 2012.
- [7] CHAPARRO A, GROFF L S. Human factors survey of aviation technical manuals, phase 1: Manual development procedures [R]. Washington, DC: FAA, 2014.
- [8] AVERS K, JOHNSON B, BANKS J, et al. Technical documentation challenges in aviation maintenance: DOT-FAA-AM-12-16 [R]. Washington, DC: FAA, 2012.
- [9] WAN Z J. Study of development IETM based on S1000D specification [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 190/191: 249-252.
- [10] 孙小琴. 飞机维修手册编制规范优化探索 [J]. *航空标准化与质量*, 2022(1): 9-12.
SUN Xiaoqin. Aircraft maintenance manual preparation specification optimization exploration [J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2022(1): 9-12. (in Chinese)
- [11] 中国民用航空局. 中国民用航空局航空器的持续适航文件: AC-91-11 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.
Civil Aviation Administration of China. Aircraft continuous air worthiness documentation: AC-91-11 [S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- [12] 中国民用航空局. 航空器制造厂家运行支持体系建设规范: MD-FS-AEG006 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2014.
Civil Aviation Administration of China. Aircraft manufacturer support development specification: MD-FS-AEG006 [S]. Beijing: CAAC, 2014. (in Chinese)
- [13] 梁钊铭, 段旭洋, 王皓. 视觉导引装配场景动态手势识别方法 [J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(2): 12-18.
LIANG Zhaoming, DUAN Xuyang, WANG Hao. Research on dynamic gesture recognition in vision-guided assembly scenario [J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(2): 12-18. (in Chinese)
- [14] 陈学文, 刘玉庆, 朱秀庆, 等. 基于手指运动方向的动态碰撞检测算法及实现 [J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(12): 2676-2681.
CHEN Xuewen, LIU Yuqing, ZHU Xiuqing, et al. Dynamic collision detection algorithm based on direction of fingers grasping virtual object and implementation [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(12): 2676-2681. (in Chinese)
- [15] 王盈, 李友荣. 多机器人体间动态碰撞检测方法仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2020, 37(4): 335-339.
WANG Ying, LI Yourong. Simulation research on dynamic collision detection method between multiple robots [J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(4): 335-339. (in Chinese)
- [16] 常宁宁. 关联矩阵法在民用飞机维修可操作性设计中的应用 [J]. *科技视界*, 2019(25): 51,62.
CHANG Ningning. The application of correlation matrix method in operational design of civil aircraft maintenance [J]. *Science & Technology Vision*, 2019(25): 51,62. (in Chinese)

(编辑:马文静)