

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.10

面向飞机运维的测试与计量数字化构想

张学涛¹, 马腾达², 石旭东²

(1.航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2.中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 介绍了数字化浪潮下国内外航空维修企业推进数字化转型的现状与成果, 分析了飞机运维中的测试与计量业务要素及其组织, 围绕“在保证安全的前提下实现维修工作提质增效”的目标, 提出了测试与计量业务的数字化构建方法, 包括资源数字化、数据数字化、流程数字化、签署数字化, 并对预期效果进行了探讨, 为建立民航维修领域统一的数字化标准提供了思路。

关键词: 飞机运维; 测试; 计量; 数字化; 智慧维修

中图分类号: TB9; V35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 03-0118-07

Digitalization of testing and metrology for aircraft operation and maintenance

ZHANG Xuetao¹, MA Tengda², SHI Xudong²

(1.Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2.Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: This paper introduces the digital transformation status and achievements of domestic and foreign aviation maintenance enterprises under the wave of digitalization, analyzes the elements and organization of testing and metrology business in aircraft operation and maintenance, proposes a digital construction method for testing and metrology business, including resource digitization, data digitization, process digitization, and signature digitization, around the goal of improving maintenance work quality and efficiency while ensuring safety, and discusses the expected effects, providing ideas for establishing a unified digital standard in the civil aviation maintenance field.

Key words: aircraft operation and maintenance; test; metrology; digitalization; smart maintenance

0 引言

航空制造业是我国较早实施并推进数字化技术的领域之一, 在2000年就率先实施了飞机制造业的数字化工程^[1]。随着信息、网络等技术的高速发展, 民航维修业也在逐步进行数字化转型, 为数字化维修的目标而努力。

尽管民航维修在航材管理、维修调度等部分领域的数字化转型取得了一定效果, 然而由于飞

机系统本身以及机队运营十分复杂, 各项维修业务在修理场所、维护性质、保障目的、操作流程等方面各不相同, 实现全部业务活动的整体数字化转型非常困难。其中, 更为基础的计量检定活动与维修主线业务的数字化互联互通更为薄弱, 已开展的数字化工作也仅限于测试设备和计量器具的设备资产的信息化管理, 没有从根本上实现活动方式的数字化转型, 因此亟待提升计量检定与其他主线业务数字化流程的结合能力。

收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 工信部民机“十四五”预研项目

引用格式: 张学涛, 马腾达, 石旭东. 面向飞机运维的测试与计量数字化构想[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 118-124.

Citation: ZHANG X T, MA T D, SHI X D. Digitalization of testing and metrology for aircraft operation and maintenance[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 118-124.



本文将介绍国内外航空产业特别是维修企业的数字化转型情况，从飞机运维角度出发，综合考虑维修、维护等过程中的测试与计量业务，从各项业务的运行逻辑出发，挖掘业务底层的共性需求，研究探讨飞机运维中测试与计量业务的数字化构建方法，以期打破维护、维修、翻修等各个业务间的隔离，为建立统一的数字化标准提供

思路。通过统一数字化标准，不同来源、不同结构、不同格式的异构运维信息能够互联互通，从而为打破企业之间的数据孤岛提供支撑。

1 飞机维修数字化转型情况

国内外航空产业的数字化转型情况如表 1 所示。

表 1 国内外航空产业的数字化转型情况
Tab.1 Digitalization situation of aviation industry at home and abroad

范围	国内	国外
民航领域	国航：智慧航线维修平台 南航：一体化智慧维修生态体系 东航：智慧机务检修中台 海航：飞机健康管理大数据应用平台	波音：AnalytX 平台 空客：Skywise 平台 汉莎：Aviatar 平台 通用：Predix 平台 法荷航：Prognos 平台
航空工业	商飞：商飞智能制造系统	空客：数字设计制造和服务计划 波音：数字系统模型和数字孪生白皮书
战略规划	民航局：《智慧民航建设路线图》	欧盟航空安全局：《EASA 人工智能发展路线图 1.0》 美国空军装备司令部：《数字化装备管理：加速未来战备》

1.1 民航领域

国内民航公司普遍建立了面向飞机维修的数字化管理系统和数据平台。国航旗下北京飞机维修工程有限公司(Ameco)开发了智慧航线维修平台，包括航线维修数字化平台(Line Operation Platform, LOP)系统和智慧机坪系统，实现了航线生产控制核心执行与智能派工、航线维修电子化工卡与电子签署、航线运行监控可视化等功能^[2]。南航机务开发了“一体化智慧维修生态体系”，推出了全国首个民航维修领域的 5G 专网，研发了“5G+AR 远程技术支持系统”、“南航 VR 航空器实训系统”、“南航飞机健康大数据监控分析系统”、“飞机远程诊断实时跟踪系统”等，推动了智能化维修进程^[3]。东航开发了 5G 智能机库应用管理系统和智慧机务检修中台^[4]，实现了机库的智能化管

理配置维修资源，并有序展开维修保障工作^[6]；还运用了 5G+AR 技术进行远程排故支援，在实际应用中取得了良好效果^[7]。

理配置维修资源，并有序展开维修保障工作^[6]；还运用了 5G+AR 技术进行远程排故支援，在实际应用中取得了良好效果^[7]。

国外的原始设备生产商(Original Equipment Manufacturer, OEM)和维护修理运行(Maintenance Repair Operations, MRO)企业也研发了维修数据分析平台，如波音公司的 AnalytX 平台、空客公司的 Skywise 平台、汉莎技术公司的 Aviatar 平台、通用公司的 Predix 平台、法荷航维修工程公司的 Prognos 平台等^[6, 8]。

1.2 航空工业领域

在航空工业领域，国内外的飞机制造企业围绕数字化研制生产均实施了数字工程发展计划。中国商飞联合中国联通、华为公司和上海交通大学等机构共同研发的商飞智能制造系统(COMAC Integrated Manufacturing Systems, CIMS)给飞机的设计研发、生产制造、试验试飞和运营支持等诸多环节带来全新变革^[9]。

欧洲空客公司启动了数字设计制造和服务(Digital Design Manufacturing and Services, DDMS)计划，DDMS 是一个集团范围内的转型计划，旨在

创造一个可以为航空产品提供虚拟设计和认证的数字环境,提高产品的研发速度、效率和质量^[10]。美国波音公司发布了“数字系统模型和数字孪生白皮书”(Boeing Digital System Model/ Digital Twin Whitepaper),以期实现数字航空建设战略目标^[11]。

1.3 战略规划层面

世界航空强国在军民航空产业领域均提出了数字化智能化发展战略规划。我国民航局于2022年发布了《智慧民航建设路线图》,对“智慧民航”的建设提出全面规划,持续深化智慧民航体系的建设,以智慧建设为主线,以智慧出行、智慧空管、智慧机场、智慧监管为抓手,强化改革创新、科技创新、基础保障三大支撑,推动行业数字化转型向前发展^[12]。

欧盟航空安全局于2020年发布了《EASA人工智能发展路线图1.0》,希望能够增强公众对人工智能航空系统的信任,制定相应的标准、协议及方法,进一步提高目前的航空运输安全水平;该路线图提出人工智能未来将更多地用于航空领域,其中飞机生产与维修等8个航空特定领域将深受人工智能的影响,并使自主飞行、预防性维护、空中交通管理优化成为可能^[10]。美国空军装备司令部于2023年发布《数字化装备管理:加速未来战备》,提出利用数字化管理加快空军装备部署、保障和现代化,并将其作为超越战略竞争对手作战能力部署的重大举措^[13]。美国空军的数字工程技术应用已贯穿于飞机研发、生产到维修和保障的全生命周期^[14],在维修保障方面,采用数字孪生技术,通过建立预测模型实时跟踪物理对象,使用数据挖掘和文本挖掘技术获取多源多层次飞行传感信息,实现对飞机多层次、多角度、多参数的检测和诊断及预测,为装备的使用和维护人员提供实时可靠的信息支持^[15]。飞机系统集成商和设备制造商可以通过机载信息采集设备,将飞机传感器数据实时传输到地面,为数字化维修提供实时数据来源^[16]。

2 飞机运维中测试与计量业务

民航领域的飞机运行维护主要是为了保持飞机持续适航状态,通常由MRO企业实施相关工作^[19],主要业务包括航线维修、定检维修/大修、

部附件/发动机维修等。

航线维修是指在航线上按照航空营运人提供的工作单,在航前、短停和航后对航空器进行的例行检查,以及按照相应飞机、发动机维护手册等进行的故障和缺陷处理。定检维修/大修是指根据适航性资料,按照规定的周期和检查项目,对航空器进行全面的检查和维护,以确保航空器的安全性能,通常在机库进行。发动机维修是指对飞机动力装置的各项修理工作,部附件维修是指对飞机的部件和附件进行维修,二者通常在专门的内场车间中进行。

为保证飞机测试数据的准确性和可追溯性,飞机维修维护过程中使用的测试设备和工具需要定期进行计量检定,因此,计量业务也是飞机维修维护过程中不可或缺的一部分。中国民航计量检测中心是我国民航维修领域的计量检测中心,主要职能包括建立民用航空最高专用计量标准器具,组织民用航空量值传递,负责民用航空专用计量器具的检定、修理及有关测试工作等。

飞机运维中的测试与计量业务要素及其组织如图1所示。飞机各系统在维护维修过程中作为被测对象,使用测试设备进行测量,利用计量器具对测试设备进行计量,航线维修或定检维修/大修时拆卸的故障件则由部附件修理部门或发动机修理部门进行维修。在推动飞机维护维修业务整体数字化转型时,必须充分考虑维修测试业务与计量检定业务及其相互间的关联性,打破各业务间资源、数据、流程等的隔膜,通过形成相应的标准和平台,建立更完善的数字化业务系统。

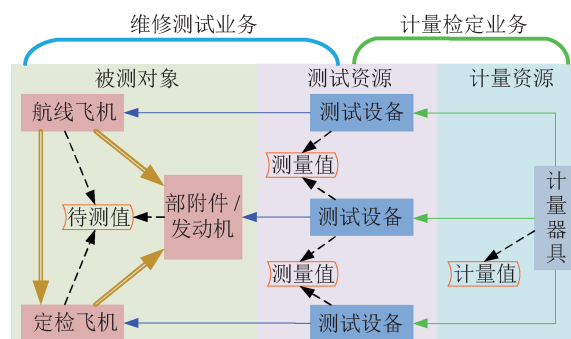


图1 飞机运维中的测试与计量业务要素及其组织

Fig.1 Testing and metrology business elements and organization in aircraft operation and maintenance

3 测试与计量数字化预期目标

将飞机运维中测试与计量的业务实体和业务过程进行数字化,构建数字实体与数字过程,从而将物理世界映射为数字世界,二者是相辅相成的关系,如图2所示。

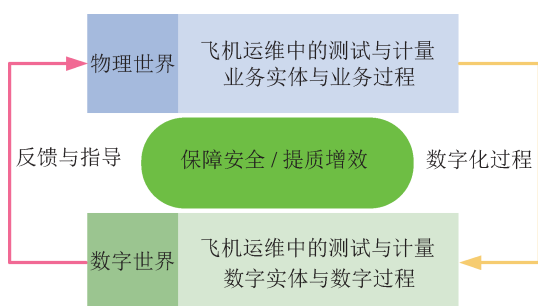


图2 物理世界与数字世界的关系

Fig.2 Relationship between physical world and digital world

在构建了测试与计量的数字世界后,通过数字世界对物理世界建立指导和反馈。例如:在数字世界中进行维修资源统筹、维修计划制定、维修调度优化、维修数据追溯等,并反馈到物理世界中,指导飞机运维中测试与计量业务的开展,从而达到在保证安全的前提下,实现提质增效的预期目标。

4 测试与计量数字化构建方法

综合考虑飞机运维中测试与计量业务,从业务的共性需求和内在底层逻辑出发,通过资源数字化、数据数字化、流程数字化、签署数字化四个数字化过程构建方法,实现测试与计量业务的数字化,从而构建数字世界。

四个数字化的内在逻辑和关联在于将飞机维修维护等各种业务所需资源进行数字化,并将这些资源相互作用下产生的数据数字化,人员使用资源按照一定流程进行操作并产生数据,通过流程数字化以及签署数字化完成这一过程和结果的数字化。

数字化构建方法统筹考虑航线维修、定检维修/大修、部附件维修、发动机维修、计量检定等不同业务的共性,从业务组织的测试和计量过程出发,打破不同业务间的隔离状态,并将保证测试量值可靠的计量业务纳入了数字化范畴,从而

为各项业务间信息的互联互通提供了支撑。

4.1 资源数字化

飞机运维的测试与计量业务中涉及被测对象、测试资源、计量资源。目前的各种资源的数字化主要以资产管理系统和航材管理系统等形式实现,缺少必要的业务属性,难以实现资源的总体统筹。

从资源角度出发,资源数字化主要包括测试设备数字化、计量器具数字化、航材备件数字化等。资源的数字化是在现有资源的资产属性数字化基础上,加入测试和计量业务属性。资产属性如资产编号、存放地点、保管人员、生产厂家等。与测试相关的属性主要包括资源特性、对外接口、计量信息等业务相关属性。资源特性主要包括功能参数、性能指标、物理结构等属性;对外接口主要包括接口功能、接口形式、电气规格等属性;计量信息主要包括计量时间、计量周期、计量参数等属性。

实现资源数字化的技术有很多种,如基于可扩展标记语言^[20]构建资源数据库、基于交联矩阵/测试约束构建接口模型等,进而可通过电子标签^[21]等技术实时追踪资源。通过资源数字化,赋能资源业务属性,进而能够实现资源的调度优化和需求的匹配规划。

4.2 数据数字化

飞机运维的测试与计量业务中涉及大量数据,不仅包括使用资源进行测试与计量得到的数据,还包括指导如何使用资源的工卡、报告、规范等文档。数据来源、数据形式、数据内容表现出高度的复杂性,即大量有价值的历史数据与现有数据在存储方式、表现形式等方面不兼容统一。例如:历史数据和现有数据既有纸质形式保存,也有电子形式存储;数值、文字、图片等形式多样,但多以人工填写、录入或记录等形式生成。可以预见,随着技术的发展,现有数据与未来数据也具有类似的异构情况。

数据数字化,就是从多维度对数据进行数字化,除了数据内容本身之外,还包括时空信息、数据来源、数据类型、文档种类等。时空信息包括数据的数值的记录时间地点、文档的批准时间等信息;数据来源是指当前数据的直接来源,以便于数据溯源;文字、语言、图像、影像等不同

数据类型,以及维修工卡、测试规范、测试报告、计量报告、校准证书等不同文档种类,则需要针对性处理,实现结构化存储。

此外,针对不同类型的数据采用自动化手段收集,可以降低人员的数据录入负担及人为因素造成的数据异常,提高数据收集效率。可采用基于信息抽取技术的文档结构化、基于大模型的操作数据提取、基于自然语言处理的信息提取、基于自动化的数据采集等方式实现数据数字化。数据数字化能够有效降低数据溯源成本,显著提升数据利用空间。

4.3 流程数字化

由于飞机系统本身以及维修业务的复杂性、不同业务间的差异性、作业环境的多样性等因素,整个业务流程完全实现从物理世界映射到数字世界十分困难,仍然存在标准难以统一、操作不够便捷等诸多挑战。

流程数字化主要指将不同的业务流程进行数字化,主要包括航线维修流程数字化、定检维修/大修流程数字化、部附件维修流程数字化、计量检定流程数字化等。

目前主要采用交互式手册、电子工卡工单等方式实现维护维修业务流程标准化,此外,利用“AR+5G”技术使得上述业务的远程操作成为现实,采用基于图的流程表征、基于行为的流程建模、基于数字孪生的流程仿真等技术方法持续推动流程数字化,并通过指控平台、电子看板等多样化的形式,为维修维护工作提供了智能排班、远程支援、调度优化等任务指导和执行反馈,能够实现维修计划制定与优化、业务操作增强指引等诸多有益效果,进而提升维修品质。

4.4 签署数字化

飞机运维测试与计量业务中,有不同类型的文件需要操作人员、复核人员、审批人员等不同类型人员进行签署。人工手写签署耗时费力,容易出现手写签署不规范、遗忘签署等人为差错。

签署数字化主要包括维修工卡签署数字化、测试报告签署数字、计量证书签署数字化等。签署数字化主要通过电子签署实现,电子签署能够保障文件的完整度和真实可靠性,保障其在业务系统中安全流转,具有防篡改、防抵赖等特点^[22]。

基于人脸识别、数字证书、UKey、区块链等技术的电子签署^[23],已在电子商务等领域得到了广泛应用。结合民航维修特点,将其应用于飞机运维测试与计量业务中,能够减轻工作人员的签署负担,拓宽签署内容,提高签署效率。

5 测试与计量数字化预期效果

通过资源数字化、数据数字化、流程数字化、签署数字化,将飞机运维中的测试与计量业务映射到数字世界,使得物理世界与数字世界二者间能够交互影响。充分运用人工智能等新技术,在数字世界中建立智慧运维大脑,实现资源、数据、流程、签署的协调优化。

测试与计量数字化的预期效果如图3所示,在维修前,智慧运维大脑能够从整体上统筹需求,匹配需求和资源制定维修计划;在维修中,智慧运维大脑能够实时对资源调度进行优化,并为一线人员提供操作引导,精准管理维修现场;在维修后,智慧运维大脑可以深度挖掘测试与计量数据,实现预测性维修和安全性评估,并能够保证数据的可溯源性。通过数字化为飞机维修提供指导,最终达到智慧维修与计量的预期效果;同时,其有益效果不仅局限于单一企业,还能实现跨企业的互联和互助,共同应对复杂状况,尤其是突发的应急业务场景。

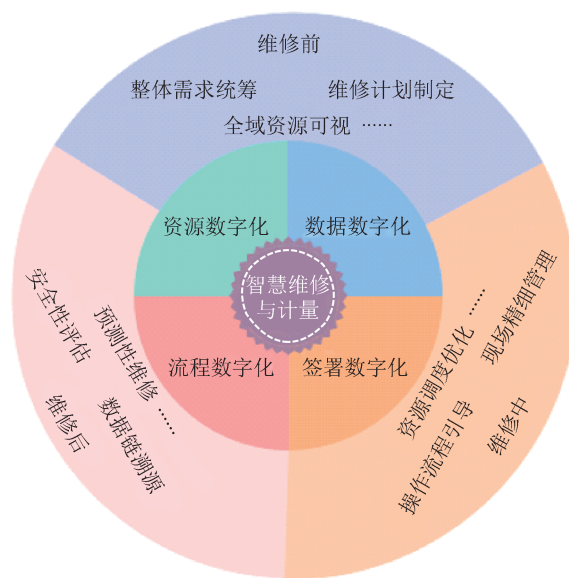


图3 测试与计量数字化的预期效果

Fig.3 Expected effects of digitalization in testing and metrology

6 结论与展望

新技术的应用为推进维修数字化进程起到了重要作用,越来越多的从业人员意识到需要将计量业务等内容纳入到维修测试范围中,从而对飞机维修维护的全过程进行数字化,并打破各项业务之间的隔离状态,实现业务互通的数字化,进而打破企业之间的数据孤岛。

本文面向飞机运维,综合考虑测试与计量业务,提出了资源数字化、数据数字化、流程数字化、签署数字化的测试与计量数字化构建方法。从MRO业务底层逻辑和需求出发,建立统一标准,为建立民航MRO行业的数字化统一标准提供了技术参考。

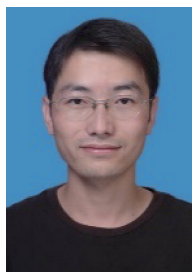
在民航维修业数字化转型过程中,还必须考虑民航领域对运行安全的高标准和严要求,对维修业务的数字化必须经过充分论证和实际验证,以确保数字化手段满足高安全性的要求,行业数字化的实施措施和路径仍然有待进一步探讨。

参考文献

- [1] 林恬,张学涛,马骊群. 基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系架构探讨[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 59-63.
- LIN T, ZHANG X T, MA L Q. Discussion on aircraft metrology assurance guarantee system based on digital design and manufacturing collaboration [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(2): 59-63. (in Chinese)
- [2] 朱雪晶. Ameco智慧航线维修平台赋能航线维修[J]. 航空维修与工程, 2023(11): 14-15.
- ZHU X J. Ameco smart line maintenance platform empowers line maintenance [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2023(11): 14-15. (in Chinese)
- [3] 吴昊,任明翔. 智慧化维修,南航在路上[J]. 航空维修与工程, 2022(8): 25.
- WU H, REN M X. Intelligent maintenance, china southern airlines on the road [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2022(8): 25. (in Chinese)
- [4] 舒文琼. 中移物联智慧机务检修中台守护东航“智”上云霄[EB/OL]. [2023-04-25]. <http://www.cww.net.cn/article?id=577120>.
- SHU W Q. China mobile iot intelligent maintenance center guardians China eastern airlines' "intelligence" in the sky [EB/OL]. [2023-04-25]. <http://www.cww.net.cn/article?id=577120>. (in Chinese)
- [5] 余静. 创新空管技术保障维修 加速数智化转型升级[EB/OL]. [2021-10-31]. https://att.caacnews.com.cn/zsfw/kggl/202110/t20211031_59718.html.
- YU J. Innovative air traffic control technology to support maintenance and accelerate digital transformation and upgrading. [EB/OL]. [2021-10-31]. https://att.caacnews.com.cn/zsfw/kggl/202110/t20211031_59718.html. (in Chinese)
- [6] 郭晓雷. 推进MRO数字化转型 打造民航智慧维修[J]. 航空维修与工程, 2021(11): 19-22.
- GUO X L. Promoting MRO digital transformation and building intelligent maintenance for civil aviation [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(11): 19-22. (in Chinese)
- [7] 姚翔,陈涛,史红义,等. 民航智慧维修应用与展望[J]. 民航管理, 2022(2): 38-42.
- YAO X, CHEN T, SHI H Y, et al. Application and prospect of intelligent maintenance in civil aviation [J]. Civil Aviation Management, 2022(2): 38-42. (in Chinese)
- [8] 杜婷. 航空业的数字化技术应用趋势[J]. 大飞机, 2022(12): 36-38.
- DU T. Digital technology in the aviation industry application trends [J]. Jetliner, 2022(12): 36-38. (in Chinese)
- [9] 顰楚. 2020智能制造、工业4.0案例TOP30[J]. 互联网周刊, 2020(12): 42-47.
- PIN C. Top 30 intelligent manufacturing and industry 4.0 cases in 2020 [J]. China Internet Week, 2020(12): 42-47. (in Chinese)
- [10] 刘作奎,蓝庆新,Ulrich Blum,等. 民航业数字化转型路径研究——以东航、汉莎为例[R]. 中国:对外经济贸易大学,德国ITEL研究院, 2022.
- LIU Z K, LAN Q X, ULRICH B, et al. Research on the digital transformation path of civil aviation industry: taking China eastern airlines and lufthansa as examples [R]. China: University of International Business and Economics, German ITEL Research Institute, 2022. (in Chinese)
- [11] BOEING. Boeing digital system model/digital twin whitepaper[R]. USA: Boeing, 2019.
- [12] 王鹏. 聚焦民航八大领域 助力经济提振[J]. 大飞机, 2024(5): 50-53.
- WANG P. Focusing on the eight major areas of civil aviation to boost the economy [J]. Jetliner, 2024(5): 50-53. (in Chinese)
- [13] 李晓松,孙亚洲.《数字化装备管理:加速未来战备》白

- 皮书解读与启示[J]. 国防科技, 2024, 45(2): 14-22.
- LI X S, SUN Y Z. Interpretation and implications of “Digital Materiel Management: An accelerated future state” by the U. S. Air Force[J]. National Defense Technology, 2024, 45(2): 14-22. (in Chinese)
- [14] EDWARD H, GLAESSGEN, STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles [EB/OL]. [2012-04-16]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20120008178/downloads/20120008178.pdf>.
- [15] 何丽娜, 范西昆, 董达飞, 等. 美国空军数字化战略的实施分析与启示[J]. 战术导弹技术, 2022(5): 99-105.
- HE L N, FAN X K, DONG D F, et al. Implementation of USAF digitalization strategy and its implications[J]. Tactical Missile Technology, 2022(5): 99-105. (in Chinese)
- [16] NIKITENKO A A. Digitalization impact on global civil aircraft MRO market growth[J]. Russian Foreign Economic Journal, 2020, 5: 53-59.
- [17] ALOMAR I, IRINA Y. Digitalization in aircraft maintenance processes[J]. Aviation, 2023, 27(2): 86-94.
- [18] 吴虎胜, 盛晟. 电子系统未发现故障研究综述[J]. 电讯技术, 2018, 58(2): 230-238.
- WU H S, SHENG S. Survey on no fault found events of electronic systems[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(2): 230-238. (in Chinese)
- [19] 王锦申, 周激光. 大型航司飞机维修管理数字化转型思考[J]. 航空维修与工程, 2021(2): 14-17.
- WANG J S, ZHOU J G. The thought of digital transformation in major airlines' aircraft maintenance management [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(2): 14-17. (in Chinese)
- [20] 王宇星, 肖峰. CAAC、FAA和EASA关于维修机构批准的规章差异分析[J]. 民航学报, 2022, 6(4): 99-102.
- WANG Y X, XIAO F. Analysis on difference of regulations on approved maintenance organization under CAAC, FAA and EASA [J]. Journal of Civil Aviation, 2022, 6(4): 99-102. (in Chinese)
- [21] 唐良运, 邹文景, 甘莹, 等. 基于XML的分布式异构数据同步系统设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18): 46-50.
- TANG L Y, ZOU W J, GAN Y, et al. Design of distributed heterogeneous data synchronization system based on XML [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(18): 46-50. (in Chinese)
- [22] 李琨, 孙伟奇, 史玉敏. RFID技术在航空器材仓储管理中的应用[J]. 物流科技, 2021, 44(10): 135-138.
- LI K, SUN W Q, SHI Y M. Application of RFID technology in aviation material warehouse management[J]. Logistics Sci-Tech, 2021, 44(10): 135-138. (in Chinese)
- [23] 杨姣珑. 面向涉密单位的电子签署系统开发[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- YAO J L. Development of electronic signature system for secret-related units [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [24] 胡泊. 计量数字化发展研究与实践进展综述[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(5): 39-44.
- HU B. A review of advances in research and practice of metrology digitalization [J]. Metrology Science and Technology, 2023, 67(5): 39-44. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩, 贾长逸)



第一作者: 张学涛(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为航空计量测试数字化。