

飞机研制检测数字化体系研究及建构

张学涛*, 王玉芳, 崔佳慧

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 随着航空制造业向数字化、智能化转型升级, 传统依赖人工、纸质记录的检测模式已难以满足现代飞机研制对高效率、高质量、高可靠性的严苛要求。针对此问题, 系统研究飞机研制检测数字化体系的内涵、架构及要素关联关系, 在分析必要性、给出总体思路的基础上, 建构包含三层(基础、支撑、活动)及八要素(组织、技术、流程等)的体系, 重点研究核心要素建构与关联, 并提出工程验证实施方案与实施策略。研究表明: 建立全流程、全要素、全数字化的飞机检测体系, 能够为检测融入飞机数字化研制主流程提供活动范式, 解决制约敏捷高效生产发展面临的检测能力不匹配问题, 并为推动检测专业机构的数字化转型提供重要思路。

关键词: 航空制造; 飞机研制; 数字化检测; 体系架构; 全流程; 全要素; 工程验证; 并行协同

中图分类号: TB9; V262; V441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 02-0070-08

Research and construction of a digital system for aircraft development and testing

ZHANG Xuetao*, WANG Yufang, CUI Jiahui

(AVIC Changcheng Institute of Metrology Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: As the aviation manufacturing industry undergoes a digital and intelligent transformation, traditional inspection methods that rely on manual labor and paper records can no longer meet the stringent requirements for high efficiency, high quality, and high reliability in modern aircraft development. To solve this problem, this paper systematically studies the connotation, architecture, and element interrelationships of the digital system for aircraft development and testing. Based on an analysis of necessity and the presentation of an overall approach, a system architecture comprising three layers (foundation, support, and activity) and eight elements (organization, technology, process, etc.) is constructed, with a focus on the construction and interrelationships of core elements. Furthermore, an engineering verification scheme and implementation strategy are proposed. The research indicates that establishing a full-process, full-element, full-digital aircraft inspection system can provide an activity paradigm for integrating inspection into the mainstream digital aircraft development process, address the mismatch in inspection capabilities that constrain agile and efficient production development, and offer important insights for advancing the digital transformation of specialized inspection institutions.

Key words: aerospace manufacturing; aircraft development; digital inspection; system architecture; full process; all elements; engineering verification; parallel collaboration

收稿日期: 2026-03-13; 修回日期: 2026-04-09; 录用日期: 2026-04-15; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 国家“十四五”基础预研项目

引用格式: 张学涛, 王玉芳, 崔佳慧. 飞机研制检测数字化体系研究及建构[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 70-77.

Citation: ZHANG X T, WANG Y F, CUI J H. Research and construction of a digital system for aircraft development and testing[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 70-77.



0 引言

自2002年国内推进飞机研制数字化工程以来,飞机设计与制造活动的数字化水平得到了显著提升,形成了以建模与仿真、并行定义、单一数据源、协同工作平台^[1]为主要特征的数字化生产方式,大幅度缩短飞机型号研制周期、减少研制费用、降低生产成本、提高产品质量。在飞机研制数字化工程^[2]中,需要设计、制造、检测、试验、试飞、服务六个专业活动并行协同工作。检测是确保飞机产品全寿命周期^[3]单位统一、量值准确、过程受控、数据可靠的一项重要专业活动,其发挥着建立用户对产品质量信任的重要作用。但是目前国内大多数飞机研制单位的检测活动仍处于研制流程的后端,即产品实物加工完成后方才介入,呈现出典型的“后置验证”特征。在作业模式上,普遍沿用“二维图纸+纸质记录+人工判读”的传统方式,检测数据的采集、传递、分析与存储高度依赖手工操作和离线处理,导致检测效率低、差错率高、数据追溯困难。具体而言,检测规划仍以二维图样为依据,检测执行依赖通用量具及人工读数,检测结果记录于纸质表格或零散电子文档,合格判定多凭经验或人工比对,检测数据与设计、制造环节难以实现闭环反馈。这种传统检测模式已成为制约数字化效益充分发挥的瓶颈,突出表现在:一方面,检测滞后于设计与制造活动,无法及时发现工艺或设计问题,造成返工周期长、成本高;另一方面,检测数据未能有效进入产品数据管理系统,难以支撑质量追溯与持续改进。

随着飞机研制数字化向纵深推进,检测数字化已成为实现产品全寿命周期数字化生产管理线全面贯通的必要基础。以波音、空客为代表的国外航空巨头已普遍开展检测数字化工作,建立了较为完善的检测数字化体系。例如,波音在787项目中全面应用基于模型的定义(Model-Based Definition, MBD)技术,将检测信息直接嵌入三维模型,实现了检测规划、执行与数据管理的全流程数字化;空客则依托其产业链协同平台,将数字化检测延伸至供应商,形成了覆盖设计、制造、装配、

交付的全链条检测数据流。这些举措有效支撑了飞机协同制造^[4]与质量保证,显著提升了民机产业的整体技术水平和生产效率。

相比之下,国内民机产业链正处于数字化转型的关键时期,检测数字化虽有局部突破,但整体上尚未形成系统化体系。部分领先主机厂在特定零部件(如大型结构件、复杂钣金件)上开展了基于MBD的数字化^[5]检测试点,应用激光跟踪仪、白光扫描仪等先进设备,实现了单点测量数据的自动采集与初步处理。然而,从全产业链角度分析,检测数字化仍面临以下突出问题:①检测标准与规范不统一,各厂所间检测数据格式、接口各异,难以实现跨企业协同^[6];②检测数据管理分散,缺乏与产品数据管理(Product Data Management, PDM)、制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)等系统的有效集成,形成新的“数据孤岛”;③检测工艺设计仍以二维图样为主,三维检测模型^[7]的生成与传递尚未形成闭环;④检测设备数字化程度参差不齐,大量老旧设备不具备数据自动采集与上传能力。总体而言,国内检测数字化水平仍较低,主要依赖传统检测手段、方式、方法,严重制约了民机全产业链数字化水平的整体提升与高质量发展。

在航空产品的客户需求不断增加、系统复杂性不断提升的背景下,柔性化、客制化需求对航空产品的性能、质量、研制效率要求越来越苛刻,开展检测数字化体系研究,实现检测数字化生产管理服务方式,是推动传统航空技术、系统和产品生产方式根本变革,进而缩短研制周期、提高质量、降低费用与成本、增强应变能力的必要途径。本文系统研究飞机研制检测数字化体系的内涵、架构与基本要素,梳理基本要素间的关联,提出工程验证实施方案与策略,为推动航空制造领域发展提供技术支撑。

1 基本概念建立

检测数字化的本质是对检测活动的“模式、流程、方式、方法、手段”进行系统性变革。通过与传统模式的对比,可以清晰地界定数字化的基本概念,如表1所示。

表1 传统模式、流程、方式、方法和手段向数字化过渡的若干个转变

Tab.1 Several transitions from traditional models, processes, approaches, methods, and tools to digitalization

检测活动	模式		流程	方式	方法	手段
	组织管理	数据管理				
传统活动	依靠企业内部资源,组织分散(冶金、特设、检验、计量等多个部门均涉及),存在效率瓶颈。	数据以离散的形式进行管理(存于单台设备上、各部门内甚至个人手中),存在数据孤岛。	传统流程,处于产品制造后端(往往等有了产品实物后才开始)。	出具检测报告,由产品设计、工艺人员判读是否满足设计、制造要求。	基于设计模型与检测数据进行产品合格判定。	手动、半自动设备工具占比大(千、万级或者十万级)。
数字化活动	集成行业优势资源,整合形成专业化的检测IPT,高效配置供给。	实现单一数据源管理,打通数据链。	建立数字化流程,与产品研制全过程活动并行协同,快速响应。	开展建模、仿真、预装配、实测数字样机建立,提高设计质量,优化产品匹配。	标准检测模型与实测重构模型间进行自动比对,直接获得判定结果。	采用敏捷高效的数字化设备工具,大幅减少或替代传统工具。

注:集成产品团队(Integrated Product Team, IPT)

①模式:包括组织管理模式和数据管理模式。传统模式是组织分散、数据离散的管理;数字化模式则是组建专业化的检测IPT,并实现基于单一数据源的产品数据管理。②流程:传统流程处于产品制造后端,需等产品实物研制完成后才开展检测;数字化流程则是检测与产品设计、制造并行协同,实现快速响应。③方式:传统方式依赖人工判读检测报告;数字化方式则通过建模、仿真、预装配及建立实测数字样本来提高设计质量、优化产品匹配。④方法:传统方法基于设计模型与检测数据进行产品合格判定;数字化方法则是在标准检测模型与实测重构模型之间进行自动比对,直接获得判

定结果。⑤手段:传统手段以手动、半自动设备工具为主;数字化手段则采用敏捷高效的数字化设备工具,大幅减少或替代传统工具。

检测活动从传统模式、流程、方式、方法、手段向数字化变革的核心:首先是实现从“后置验证”到“前置协同”、从“被动执行”到“主动赋能”、从“经验驱动”到“数据驱动”^[8]的转变;其次是增加基本内涵,建立“大检测”概念,即工程检测(包括产品检测、设备检测、检测装备研发、检测系统保证)的概念。

要建立“大检测”概念需要明确检测在行业内和专业研究所的业务定位,如表2所示。它不

表2 飞机研制检测内涵

Tab.2 Connotation of aircraft development and testing

专用名词	内涵描述	
	标准术语定义	本项目特指内容
飞机研制检测	对给定产品按照规定程序确定某一种或多种特性、进行处理或提供服务所组成的技术操作。	飞机研制工程中对产品尺寸、功能或性能的最终状态进行合格判定的活动统称,涵盖(检验)测量、(试验)测试、(测量测试设备)计量等当前既有的传统活动类型及后续建立的数字化活动类型。
(检验)测量	通过实验获得并合理赋予某量一个或多个量值的过程。	对产品尺寸(被测量相对静止或稳定)的检测。
(试验)测试	借助专门的仪器设备,设计合理的实验方法及进行必要的信号分析与数据处理,获取与被测对象有关的信息。	对产品功能或性能(被测量具有动态变化特征)的检测。
(测量测试设备)计量	实现单位统一、量值准确可靠的活动。	对产品研制工程中测量测试设备这类特定产品计量特性的检测(包括检定、校准、比对等方式)。

仅涵盖用于产品合格判定的检验检测活动，还包括用于产品功能、性能试验的测量测试活动，以及用于测量仪器设备保障的计量活动^[9]。简言之，“大检测”贯穿于飞机方案论证、设计、制造、试验、试飞、交付及服务的全寿命周期，是确保产品物理与功能属性符合设计要求的技术与管理活动的总和。

2 总体思路

围绕“检测作为飞机研制工程的一项相对独立且平行于其他设计专业的技术活动，以数字化协同研制方式融入产品主线”这一根本目的，从飞机研制全过程、检测活动全专业、并行协同全方位三个维度，构建飞机研制工程检测数字化基

本体系和能力，其总体思路可以用图1所示的三坐标图来展示。

xy. 从标准化角度，以程序文件奠定政策环境。基于飞机研制阶段和检测活动专业，按照并行协同的数字化研制活动理念，明确各阶段检测活动的事项及节点要求。

yz. 从数字化角度，以模型数据^[10]提供工程能力。在程序文件的指引下，按照飞机产品数字化^[11]生产方式的主要特征，形成检测活动各专业的模式、流程、方式、方法、手段。

xyz. 从体系化角度，以产线方案贯通产品主线。在程序文件和模型数据指引下，按照打通飞机检测数字化生产线的要求，实现典型产品检测数字化技术集成与工程验证。

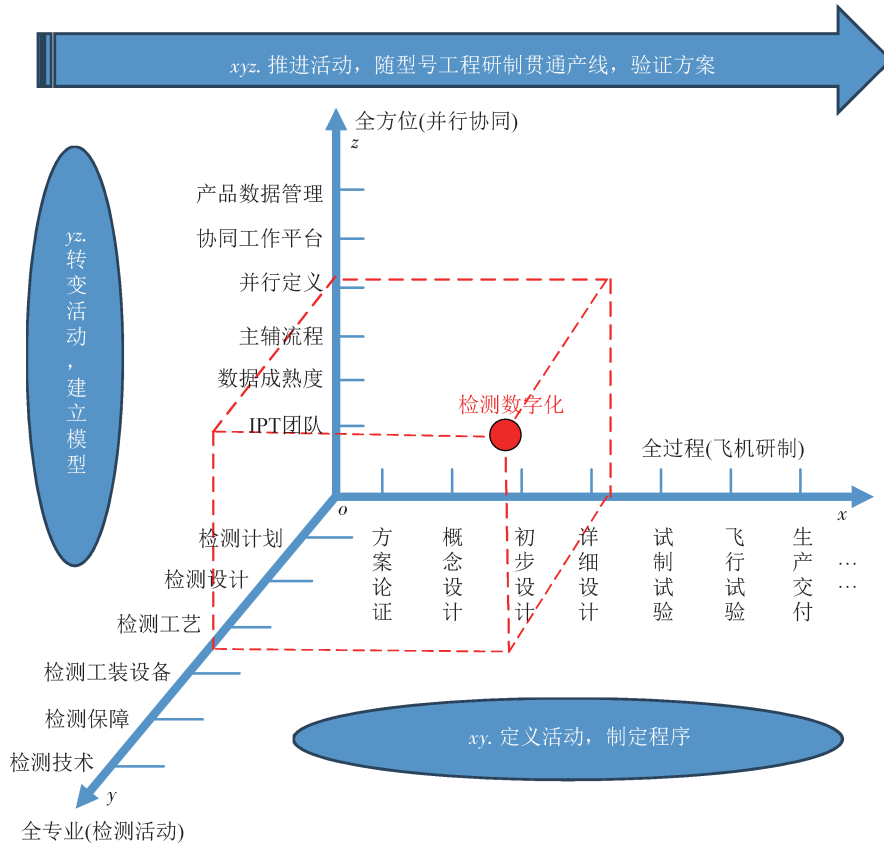


图1 飞机研制检测数字化体系总体思路

Fig.1 Overall approach to the digital system for aircraft development and testing

3 基本体系

3.1 体系框架

参照飞机数字化工程的成功实践，本文构建了飞机研制检测数字化基本体系，如图2所示。该

体系在逻辑上分为3个层次，包含8大核心数字化研制要素。

1) 活动层

活动层是体系的核心，直接产出价值，包括数字化定义和数字化生产管理两大类活动。前者

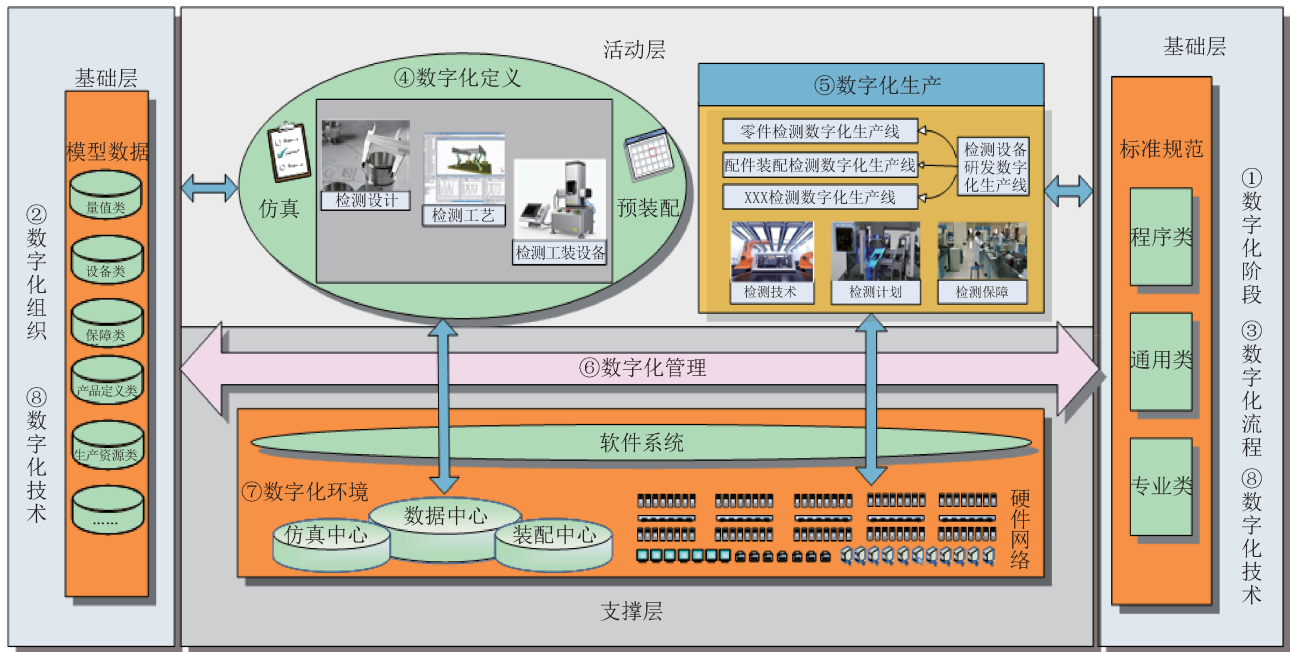


图2 飞机研制检测数字化基本体系

Fig.2 Basic architecture of the digital system for aircraft development and testing

涵盖检测设计、检测工艺、检测工装设备研制；后者包括检测计划、检测技术、检测保障。

2) 基础层

基础层为活动层提供理论、方法与标准支撑，包括数字化组织与数字化技术研究。研究成果体现为组织架构、标准规范、技术手册和各类数字模型。

3) 支撑层

支撑层为整个体系运行提供统一的软硬件环境和数据管理中枢，即数字化协同工作平台和贯穿始终的数字化PDM。

建设飞机研制检测数字化工程基本体系，需要从根本上变革现行的检测设计、工艺和管理的模式、流程、方式和手段，形成数字化检测^[12]生产方式，从而具备在新一代飞机研制生产中实施数字化检测设计、工艺和管理的工程能力，打通飞机研制检测数字化生产管理线。构建的基本体系须满足的基本要求：①要素完整且自成体系；②与既有的飞机研制数字化活动实现有机有序衔接。

3.2 体系要素含义

1) 检测数字化阶段划分

完成飞机研制工程检测活动秩序的规定，梳理、分析、定义各阶段下的主要事项，为飞机研

制检测程序标准的制订提供支撑。

2) 检测数字化组织设置

完成飞机研制检测技术组织分类、专业分工、组织矩阵及协同工作模式的设计，形成飞机研制检测固定组织与活动组织体系。

3) 检测数字化流程分解

完成飞机研制检测活动主支辅流程设计，形成检测活动的工作分解结构(Work Breakdown Structure, WBS)。

4) 检测数字化定义

完成检测数字化技术体系的基本原理、基本逻辑与基本原则的规定，提出几何量^[13]检测建模与仿真、检测数字样机预装配与检查、检测设计/工艺/装备并行定义、检测定义数据集等要求，为按照并行工程理念，实现零部件检测设计、工艺、装备专业活动内部并行，以及检测专业与其他专业活动外部并行，提供理论依据。

5) 检测数字化数据成熟度控制

完成对应零部件产品数据成熟度等级的检测数据成熟度标识，围绕标准检测模型的建立，形成数据成熟度的评审条件，数据升降级的控制准则。

6) 检测数字化生产管理

完成检测技术准备计划、生产准备计划、生

程要素是连接其他要素的主线,各要素共同保障数字化流程的顺畅运行,形成有机整体。

4 体系工程验证实施方案及实施策略

主要从组织体系、技术体系、管理体系、保障体系4个方面在主机厂开展飞机研制检测数字化体系工程验证。组织体系主要验证检测IPT组织建立的合理性,包括检测综合、检测设计、检测工艺、检测工装设备、检测软件及数据的有序配合情况;技术体系主要验证基于模型的产品检测数字化定义中五步法的具体实施情况;管理体系主要验证包括产品数据管理在内的生产管理系统运行情况;保障体系主要验证程序及标准规范的适用情况。

飞机研制检测数字化体系的建立是一个长期、复杂的系统工程,建议采用“整体规划、分步实施、迭代演进”的策略。

4.1 第一阶段:基础建设与单点应用(1~2年)

1) 第一阶段目标

构建飞机研制检测数字化基本体系,以打通典型零部件几何量检测数字化生产线为核心,形成与飞机研制专业并行协同的检测数字化工程能力。

2) 第一阶段任务

制定企业级检测数据标准;部署检测数据管理平台;在典型部件(如机械加工结构件、钣金件)的生产线上,实施基于MBD的检测^[14]规划,试点机器视觉或激光扫描检测单元。

4.2 第二阶段:集成扩展与流程协同(3~5年)

1) 第二阶段目标

检测数字化工程能力覆盖飞机研制生产与使用维修全过程,由几何量^[15]扩展至全专业领域,实现主要检测业务的全流程数字化覆盖和跨部门协同。

2) 第二阶段任务

扩大MBD检测应用范围至装配环节;建立覆盖总装、试飞环节的移动检测终端应用;实现检测平台与产品数据管理(PDM)、制造执行系统(MES)、企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)的系统集成;构建初步的质量追溯链条。

4.3 第三阶段:智能检测与体系融合(长期)

1) 第三阶段目标

建成高度智能、自适应的检测体系,并深度

融入企业数字主线,将检测数字化工程能力推广至发动机、机载系统等产品研制领域,覆盖飞机全系统、全链条。

2) 第三阶段任务

全面应用数字化技术,实现检测过程的预测与优化;建立量值库、检测方法库、设备模型库;检测数据深度反哺设计与工艺优化,形成“设计-制造-检测”闭环质量提升;检测体系与飞机研制数字化、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)体系完全融合。

4.4 保障措施

体系工程验证实施需要高层领导的坚定支持与持续投入;建立跨部门的联合项目团队;加强既懂检测业务又懂数字技术的复合型人才培养;选择具有成熟解决方案的合作伙伴;注重知识积累与流程再造。

5 结论

针对“十四五”期间航空制造业全链条、全要素的数字化转型任务,从健全飞机研制数字化体系、增强共性技术数字化工程能力的角度,系统研究了飞机研制检测数字化体系,构建了涵盖基础层、支撑层、活动层以及包含组织、技术、流程等检测八要素的检测数字化体系,其意义和作用主要体现在以下三个方面:对于航空产业,形成飞机研制检测数字化活动范式,将检测融入飞机数字化研制主流程,促进航空制造业高质量发展;对于主机单位,形成典型产品检测数字化生产方式,解决制约敏捷高效生产发展面临的检测能力不匹配问题;对于专业机构,形成“一个协同平台,数据、仿真与装配三大中心”的数字化院所建设模式,推动检测行业的数字化、体系化转型。

参考文献

- [1] 付广磊,姚玉会,吴建军,等.基于数字化协同平台的飞机研制流程研究[J].机械科学与技术,2012,31(6):1016-1022.
FU G L, YAO Y H, WU J J, et al. Research on aircraft development process based on digital collaborative platform [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 1016-1022. (in Chinese)
- [2] 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.

- 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. (in Chinese)
- [3] 宁振波. 面向飞机全寿命周期的数字化快速响应保障服务系统[J]. 新型工业化, 2023(9): 46-52.
NING Z B. Digital rapid response support service system for aircraft lifecycle[J]. The Journal of New Industrialization, 2023(9): 46-52. (in Chinese)
- [4] 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): 18-23.
LIN T, ZHANG X T, MA L Q. Discussion on aircraft measurement support system architecture based on digital design and manufacturing collaboration[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(2): 18-23. (in Chinese)
- [5] 周秋忠. 基于MBD的飞机数字化检测技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 86-92.
ZHOU Q Z. Research on aircraft digital inspection technology based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 86-92. (in Chinese)
- [6] 吴志鹏, 韩志忠, 韩普祥, 等. 跨厂所直升机数字化协同研制应用[C]//2024中国航空工业技术装备工程协会年会论文集. 北京: 中国直升机设计研究所, 2024: 49-53.
WU Z P, HAN Z Z, HAN P X, et al. Application of cross-facility helicopter digital collaborative development [C]// Proceedings of the 2024 China Aeronautical Industry Technical Equipment Engineering Association Annual Conference. Beijing: China Helicopter Research and Development Institute, 2024: 49-53. (in Chinese)
- [7] 孙聪. 飞机全三维快速响应试制应用技术[J]. 航空科学技术, 2013, 24(2): 1-6.
SUN C. Application technology of full three-dimensional rapid response trial production for aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(2): 1-6. (in Chinese)
- [8] 张轩铭. 浅谈基于数据驱动的创新型智慧计量平台发展方向[J]. 工业计量, 2022, 32(2): 72-74, 76.
ZHANG X M. Discussion on innovative intelligent measurement platform based on data drive the development direction[J]. Industrial Measurement, 2022, 32(2): 72-74, 76. (in Chinese)
- [9] 周文东, 蔡飞鹏, 刘楨, 等. 飞机型号计量保证体系的建立与运行[J]. 工业计量, 2024, 34(1): 74-77.
ZHOU W D, GOU F P, LIU Z, et al. Establishment and operation of aircraft type measurement guarantee system[J]. Industrial Measurement, 2024, 34(1): 74-77. (in Chinese)
- [10] 王玉芳, 赵俭. 基于CFD技术的气流温度传感器数值校准虚拟风洞初探[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 91-94.
WANG Y F, ZHAO J. Preliminary study on virtual wind tunnel for numerical calibration of airflow temperature sensors based on CFD technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 91-94. (in Chinese)
- [11] 周红桥, 于振华, 丁红宇, 等. 基于数字样机的产品数字化设计与制造标准体系构建[J]. 中国标准化, 2011(9): 47-52.
ZHOU H Q, YU Z H, DING H Y, et al. Construction of product digital design and manufacturing standard system based on digital mock-up [J]. China Standardization, 2011(9): 47-52. (in Chinese)
- [12] 王睿喆, 何海波, 王正勇, 等. 基于三维点云的油套管螺纹几何参数数字化检测方法[J]. 计算机应用, 2026, 46(3): 1-11.
WANG R Z, HE H B, WANG Z Y, et al. Digital detection method of oil casing thread geometric parameters based on 3D point cloud[J]. Journal of Computer Applications, 2026, 46(3): 1-11. (in Chinese)
- [13] 何学军. 几何量数字化测量方法与装备的现状与发展趋势[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 35-40.
HE X J. Present situation and development trend of geometric digital measurement method and measuring equipment [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 35-40. (in Chinese)
- [14] 熊辉, 王仲奇, 吴丹, 等. 基于MBD的飞机数字化检测技术研究与应用[J]. 航空学报, 2015, 36(增刊1): 1-8.
XIONG H, WANG Z Q, WU D, et al. Research and application of aircraft digital inspection technology based on MBD [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(supplement 1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 蔡项宇, 何小妹. 融合几何特征的ICP改进算法在数字化测量评价中的应用[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 27-33.
CAI X Y, HE X M. Application of improved ICP algorithm incorporating geometric features in digital measurement and evaluation[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(6): 27-33. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 张学涛(1983-), 男, 研究员, 主要研究方向包括民机计量测试、检测数字化等。