

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.15

基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系架构探讨

林恬, 张学涛, 马骊群

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 在国家科技创新, 数字化设计制造高速发展的背景下, 先进的数字化制造与传统的“先制造后检测再校准”的计量保障模式的矛盾愈发突出。以几何参数的数字化计量保障能力为例, 通过分析对比国内外航空数字化设计制造工程中的几何参数计量保障工作现状, 提出在飞机全生命周期内要保证产品数字化制造的几何尺寸精度, 应依据新的产品几何规范, 从产品的数字模型定义出发, 面向数字化设计制造协同的关键过程和关键参数的测量溯源性要求, 研究架构新的数字化计量保障技术体系, 并就体系架构展开探讨。

关键词: 计量保障; 体系架构; 飞机数字化; 设计制造协同; 全生命周期; 溯源链

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0059-05

Discussion on Aircraft Metrology Assurance Guarantee System Based on Digital Design and Manufacturing Collaboration

LIN Tian, ZHANG Xuetao, MA Liquan

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

Abstract: Under the background of high-speed development of national scientific and technological innovation and digital design and manufacture, the contradiction between advanced digital manufacturing and the traditional metrological assurance mode of "first manufacturing then testing and then calibrating for assurance inspection" is increasingly prominent. In this paper, taking the digital metrology capacity of geometric parameter as an example, by analyzing and comparing the current situation of geometrical metrology assurance guarantee status in aviation digital design and manufacturing projects at home and abroad, it is proposed that in order to ensure the geometric dimension accuracy of products digital manufacturing in the whole life cycle of aircraft, following the new product geometric specifications, starting from the definition of digital model of products, according to the measurement traceability requirements of key processes and key parameters for digital design and manufacturing collaboration, the new digital metrology guarantee system should be studied and discussed.

Key words: metrology assurance; system architecture; aircraft digitization; design and manufacturing collaboration; full life cycle; the chain of traceability

0 引言

为推动我国从制造业大国向制造业强国转变, 2015年5月国务院正式发布了《中国制造2025》。航空装备制造业是《中国制造2025》战略落地的中坚推动力, 是先进制造技术应用的集大成者, 也是国内较早推进数字化技术的领域之一, 早在2000年就率先实施了飞机制造业的数字化工程。经过十多年的发展, 产品数字化定义技术、数字样机技术、数字化工艺与虚拟装配技术、数字化仿真分析计算、数字化管理技术等在新飞机研发生产过程中得到了较为深入的应用, 各大飞机制造企业已形成了多条数字化生产线, 基于

模型的数字化设计制造协同平台建设初具规模。

飞机数字化设计制造协同是指在产品数字模型的引导下, 根据用户的需求, 在虚拟三维建模设计、仿真计算、计算机网络、数据库和多媒体等数字化技术支撑下, 使得贯穿飞机设计制造全生命周期的过程基于同一数据源及时交互、实时反馈、并行展开, 从而实现信息资源更加高效、快速传递与共享的全新的飞机设计制造模式。产品的设计制造精度取决于产品数字模型的公差定义、工艺仿真、加工设备、工装、检测设备各个环节的量值传递与溯源能力。目前这个过程的计量保障模式仍采用传统的“先制造后检测再校准”模式, 无法满足数字化设计制造对计量保障提出的

并行、实时、在线、交互等新的技术要求，更无法综合评价保证整个数字化系统的制造精度。要解决上述问题，应从数字化技术的源头着手，研究探讨新的数字化计量保障体系。

飞机数字化设计制造过程各环节涉及的参数众多，文章以数字化设计制造过程中占比最多、影响最广泛的几何参数计量保障为例，研究探讨如何架构基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系。

1 国内外发展现状及趋势

1.1 国外发展现状及趋势

欧美国家先进航空制造企业已经进入全面数字化时代，利用基于模型定义 (Model-Based Definition, MBD) 技术，形成了产品设计、制造、装配、测量等一系列模型，以模型为载体使数据在设计、生产、试验和使用维护各环节中均保持一致性和可追溯性，进而极大促进了产品生产效率，大幅度提高了产品质量。波音 777 是全球第一个采用全数字化定义的飞机，使设计更改造成的返工比原来减少 50%，研制周期缩短 25% 以上，制造精度提高一个数量级。到波音 787，产品设计全面采用 MBD 技术，通过三维数据集定义产品信息，包括模型尺寸、公差、零件表、制造工艺、注释、分析数据、测量要求等，以此三维数据集作为制造驱动的唯一数据源，实现产品设计 (含工艺设计)、工装设计、零件加工、部件装配、检测检验等工作的高度协同，开创了飞机数字化制造的全新模式。

国际尺寸与产品技术委员会 (ISO/TC213) 从 2000 年提出了新一代产品几何规范 (Geometrical Product Specifications and Verification)，新一代产品几何规范是为适应产品数字化模型定义而建立的一系列产品几何特性与测量的技术标准，覆盖了产品从宏观到微观的所有几何特征的描述要求，适用于从设计、制造、验收到使用、维修、报废等产品全生命周期的几何特征表达、检测、校准等要求。欧美先进航空制造企业依据新一代产品几何规范制定并逐步完善与之相应的三维检测技术规范，开发并部署了相应的计算机辅助三维检测规划与测量数据分析系统，建立了较完整的数字化技术标准体系。^[1]

1.2 国内发展现状及趋势

从推行无纸化设计、无纸化加工开始，国内航空制造企业陆续启动了数字化设计、数字化制造的技术升级，以设计所、生产厂的流程对接为抓手，逐步实

现了由计算机三维设计软件、数控加工装备等构成的产品数字化设计制造协同工作平台。

依托协同工作平台，在设计环节实现了产品的数字化并行定义，数字量传代替了实物量传，建立了产品数据中心、数字样机装配仿真中心、功能/性能仿真中心，有效解决了传统产品研制模式中数据难以共享、工作难以协同等问题；在生产环节大量采用数字化工工艺装备，构建了数字化制造平台，打通了结构件数字化切削加工、数字化复合材料构件、数字化钣金、数字化焊接、数字化装配、数字化工装等数字化生产线、建设了制造数据、工艺仿真、物料配送、生产管控等技术支持中心，基本构建形成了飞机数字化制造体系。

在数字化设计方面，某飞机设计所建成了由三维设计软件 CATIA、产品数据管理软件 LCA 以及运行这些软件的工作站和服务器构成的产品并行定义工作平台，使得产品设计、工艺、工装、生产准备得以协同工作，对飞机产品具备了数字化并行定义的能力。

在数字化制造方面，某飞机制造厂以数字样机作为统一的几何数据源，用数字量协调替代了传统的模线样板与标准样件协调方法，减少了环节的协调误差，实现了协调误差的主动控制。通过容差分配、装配仿真、加工仿真、成型仿真、焊接仿真等基于数字模型的虚拟生产过程，极大地提高了产品研制生产效率。同时，由于大型民机的外形结构件尺寸大、刚性差，对装配定位要求精度和由于变形产生的交付前后测量数据差异控制精度等提出了极高的要求。然而不同承制单位或部门采用的测量基准、测量手段、部件结构状态、测量状态等不一致，尚未在数字化装配测量基准网的研究基础上，构建一个多系统协同测量平台，统一基准、方法、状态等关键要素，导致最后的交接状态误差源认定困难，直接增加了装配对接过程中工艺、工装调整的难度，增加了部件装配对接过程中的工艺不确定性。^[2]

综上所述，尽管随着飞机数字化工程的深入推进与产品设计制造协同技术的广泛应用，极大地提高了产品的生产效率和产品的一致性。然而关于产品的过程质量控制技术和产品的合格性检验技术依然以基于特定几何特征的评价方法为主，公差的控制采用的是基于产品设计要求的特征控制，这种控制过程尽管严格遵守传统的量传体系要求，但它以有限的特征来描述产品的质量，忽略了产品的功能、使用状态等，为了解决这一问题，人们开始通过过度测量达到对产品

进行整体控制的目的,然而仍然无法对产品进行整体描述,数字化计量技术手段的建设还明显滞后。2005年起,在航空、航天、汽车、船舶等数字化高端制造业领域涌现出大量关于数字化测量/检测技术、大尺寸组网数字测量技术等的相关文献,这些文献大多以应用为主,即先进的数字化测量技术解决以往传统无法解决的检测问题,使对产品的测量看起来更加完整。然而,这些研究依然沿用传统的产品几何规范,无法满足新兴数字化生产的需求,即如何用有限的测量来描述产品的真实状态。2012年我国发布了新一代产品几何规范,该规范基于系统工程和系统建模思想,给出了描述产品的新的定义和评价要求,但是至今,依然缺少关于数字化计量保障体系的研究。因此,借鉴国外先进航空制造企业数字化工程的成功经验,结合国内飞机数字化设计制造技术发展需求,架构满足数字化生产需求的基于模型的数字化计量保障体系,研究建立可支撑飞机产品数字化设计制造协同所需的计量技术,已成为计量技术领域发展的新兴命题和重要任务。

2 数字化计量保障体系研究思路与架构方案

2.1 体系范围与内涵

基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系,指为规范飞机数字化设计制造协同过程中相关数字化模型、数字化制造核心智能测控装置与部件、数字化检测系统等量值控制要求,建立的具有规定不确定度描述,与国家或国际计量标准相关联并满足产品功能需求检测和校准要素的一系列技术、方法、程序与标准的集成。

2.2 体系构架思路

飞机数字化设计制造协同以产品数字模型为牵引,产品数据流通过模型载体贯穿全生命周期和全参数溯源链,因此可以构造一个立体结构,从三个维度考虑分析计量保障体系的构架。

第一个维度从产品全生命周期的维度分析。分为设计、工艺、加工、装配、检测、使用等,整个维度以产品的数字模型为主,将模型按照阶段分解,并形成全生命周期统一的可计量的基于产品全生命周期的描述方法。如设计阶段需要给出产品的数字定义、属性、功能要求等基本信息;工艺阶段需要给出满足产品生产要求的过程要素、设备要素、执行要素、操作要素等说明文件;加工阶段需要根据产品模型给出的属性、功能要求和工艺要求进行过程控制方法,包括

文件控制、设备控制、验证控制、成品控制等;产品实际装配阶段,通过装配过程可计量性设计与规划确保伺服控制的柔性工装、高精度高效率的数字化测量系统以及装配定位基准等符合产品预装配阶段的可视化仿真和基于数据的可装配分析^[3];检测阶段需要按照描述产品的数字特征和功能公差给出满足产品评价的检验要求,包括检验标准、检验设备、检验条件、检验结果等。

第二个维度从产品参数溯源链的维度分析。溯源链架构从参数着手,以量化的参数为牵引,理清参数定义,明确参数量值范围,规范参数检测评价方法,确定参数检测手段与适用仪器设备,针对参数检测用仪器设备或系统梳理适用校准装置以及相关的校准技术规范,明确校准装置技术指标,确定计量标准器具及相应的计量技术规范,使得各个环节的参数量值在计量单位一致的基础上实现参数量值与计量标准器具量值的比较,建立起“飞机产品参数→测试设备参数→校准设备(含工作计量器具)参数→计量标准参数→计量基准参数”的完整溯源链。

第三个维度从计量保障关键构成要素的维度分析。该维度也是与传统几何量计量评价体系相比改变最大的地方。不同在于描述产品计量属性的基本单元为“空间点”,评价产品计量属性的基准为“坐标系”。换个角度讲,由于产品任何一个几何特征都可建立特征坐标系,产品设计时有设计坐标系,因此计量评价时也需要建立评价坐标系,且两者相互关联。基于模型的数字化计量是在统一的数字模型基础上对产品进行评价,当评价坐标系与设计坐标系的转换公差确定时,所有的描述产品计量属性的基本单元“空间点”就可以联系起来,实现对产品数据流的完整计量保障。围绕“空间点”和“坐标系”这两个基本的计量要素,数字化设计制造协同过程中相关的计量保障关键构成要素还包括:复杂型面的几何特征点参量化定义与评价、点云测量误差分析与计量评价、测量基准点建立与校准、测量组网整体定位精度校准、基准转换及误差校准、坐标系统一融合与测量不确定度分析评定、运动态测量定位误差分析与计量评定等诸多内容。

2.3 体系架构方案

综上所述,基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系应从产品全生命周期、产品全参数溯源链以及计量保障关键构成要素三个维度构建一个立体的、协调的、综合的体系架构,其设计方案如图1所示。

结合飞机蒙皮的数字化设计制造协同过程,进一

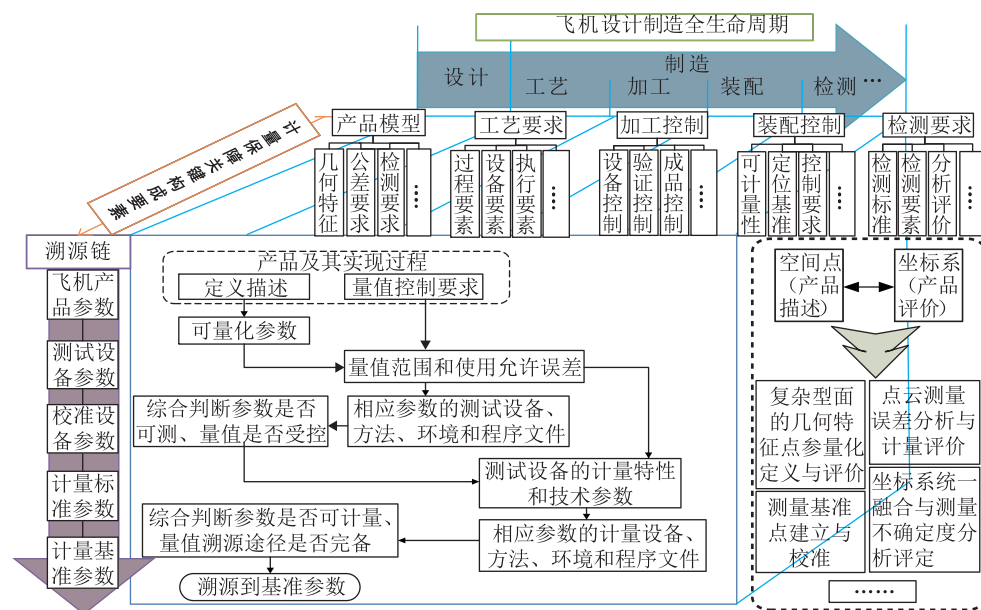


图1 基于数字化设计制造协同的飞机计量保障体系

步探讨数字化计量保障体系架构。从产品全生命周期的维度，飞机蒙皮设计制造是在建立产品理论数学模型的基础上，采用集 CAD 设计、CAE 仿真、数控加工、CAM 切边和化铣刻线、数字测量为一体的数字化技术实现完成的。在这一过程中，数字化测量平台和数字化计量保障作为蒙皮产品质量控制和评价的重要手段，贯彻整个生命周期始终，参与制造成型与装配过程的同时，通过测量数据的分析反馈，实现蒙皮的优化设计，最终保证蒙皮的精确成形^[4]，如图2所示。其中，数字化测量平台可以根据蒙皮的数学模型确定制造、装配过程中的关键几何特征参量，建立制造、装配工艺基准和测量基准，选择优化测量方案并将不

同系统的测量数据进行融合，实现各系统间的基准转换和坐标系的统一，进而支撑产品数字化设计制造协同；数字化计量保障从产品全参数溯源链和计量保障关键构成要素的角度，梳理分析产品及其实现过程参数的数字化计量保障需求及溯源路径，并重点解决诸如蒙皮复杂自由曲面的几何特征点参量化定义与评价、曲面数字化测量点云误差分析与评价、制造装配工艺基准和测量基准的建立与计量评价、坐标系统一融合与测量不确定度分析评定等问题，从而实现数字化设计制造协同条件下产品的完整描述及全面计量保障。

3 结论

数字化计量保障体系架构，是国内首次以综合的观念对新兴的数字化设计制造协同过程的计量保障方法展开探讨研究。其意义在于，从计量学量值溯源的角度，打破传统的单一参数计量校准思路，从体系构架上综合研究数字化设计制造全过程的校准体系构建问题，进而从根本上系统保证了数字化设计制造全生命周期的量值可靠准确，从而有效保障数字化制造质量更加精准更快提升；推而广之，可为航空装备制造数字化设计与制造一体化协同工作平台的建设完善提供基础技术支撑，其数字化、网络化、智能化发展，并为其其他高端装备制造业技术基础体系建设提供参考样板，为系统建设国家工业基础数据库、实现智能制造、工业强基、制造业创新中心建设等“中国制造2025”重大工程提供技术支撑。

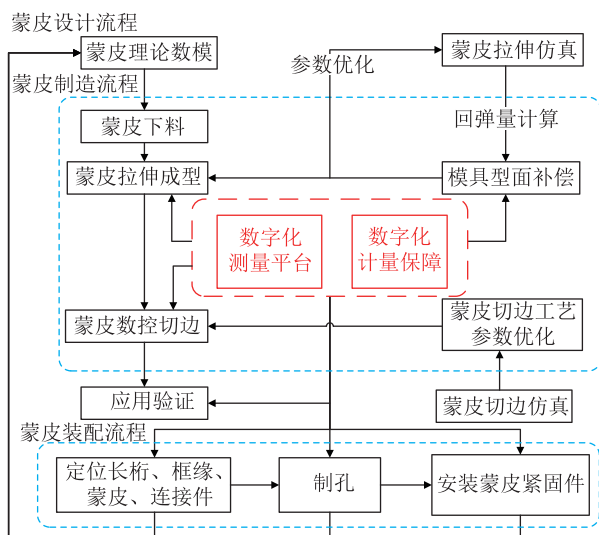


图2 飞机蒙皮数字化设计制造协同过程及其计量保障

参 考 文 献

- [1] 杨敏洁, 王杨, 张守辉. 全数字量传递产品检测技术的研究与应用[J]. 航空制造技术, 2014(22): 125.
- [2] 张新国. 新科学管理—面向复杂性的现代管理理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 322-426.
- [3] 杜福洲, 文科. 大尺寸精密测量技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2016(11): 20-21.
- [4] 马运辉, 王星驰, 李西宁, 等. 飞机蒙皮的数字化制造及检测技术研究[C]//2013年首届中国航空科学技术大会论文集, 北京, 2013.
- [5] 郝建春, 梁昭磊, 汪启华, 等. 数字化环境下航空装备研制质量管理的思考[J]. 航空标准化与质量, 2012(04): 9.
- [6] WANG J, GUO J, WANG H, et al. The evaluation of meas-

urement uncertainty for laser tracker based on Monte Carlo method[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2011: 608-612.

收稿日期: 2018-01-20

基金项目: 工信部民机专项科研项目(MIZ-2015-J-112)



林恬(1983-)女, 工程师, 从事航空计量科研管理工作。

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大16开本, 单月20日出版。国际刊号: ISSN 1008-6145, 国内刊号: CN37-1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA)千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。2018年单价15元, 全年90元。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续, 欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址: 山东省济南市108信箱杂志社 邮编: 250031 电话: (0531)85878132, 85878224, 85878148

E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.com

《化学分析计量》2018年第2期目次

标准物质

空气中偏二甲胍气体标准物质的研制

分析测试

气相色谱法同时测定2-甲基吡嗪和2-氰基吡嗪

超高效液相色谱-串联质谱法测定湿巾中5种异噻唑啉酮类防腐剂

石墨消解-火焰原子吸收光谱法测定土壤和沉积物中铜、锌、镍、铬

UPLC-MS-MS法测定塑料包装材料中四溴双酚A

在线凝胶渗透色谱-气相色谱串联质谱法分析土壤和茶叶中的多氯联苯

ICP-MS法同时测定儿童洗涤护肤产品中17种有毒有害元素
淋洗液在线发生离子色谱法测定血液透析水中的 F^- , NO_3^- , SO_4^{2-}

气相色谱-质谱法测定涂料中游离氨基甲酸乙酯

电感耦合等离子体质谱法测定食品中的锡

惰气熔融-红外吸收法测定钛金属中的氢

固相萃取-气相色谱法测定水果中6种有机磷类农药残留

石墨炉原子吸收光谱法直接测定铁镍基高温合金中的锡

ICP-MS法测定食品接触纸制品中铬、镍、砷、镉、铅、汞

气相色谱-三重四级杆质谱法测定甘蓝中的6种常见农药残留

高效液相色谱法测定抗菌乳膏中的三氯生

分散液液微萃取-气相色谱-质谱法测定水中3种硝基甲苯同分异构体

ICP-OES法测定清半夏和制白附子中的白矾

布洛芬注射液包材相容性研究中铅、镉、砷、锑的测定

固相萃取-气相色谱-质谱法测定地表水中的三氯苯

气相色谱法测定饮用水中二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷

计量技术

动态法评价等离子体发射检测器的线性和检出限

标准测量方法在冶金分析仪器计量性能评价中的应用

原子荧光形态分析仪的校准方法及不确定度评定

实验室管理

利用能力验证结果评价参加实验室的整体检测能力

法定计量检定机构计量授权与实验室认可管理体系文件整合的探讨

原子荧光法测试汞的漂移对策及比色管材质选择

仪器设备

用于PM2.5样品测定的全反射X荧光仪的研制

综述

饮用水消毒副产物测定方法的研究进展

水产品挥发性成分研究进展