

引文格式: 邢一新. 飞机装配几何量质量检测体系构建及关键技术 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 24-31.

XING Yixin. Research on establishment and key techniques of aircraft assembling geometric measurement system[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 24-31.

# 飞机装配几何量质量检测体系 构建及关键技术\*

邢一新

(航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 针对新一代飞机装配过程几何量检测的高精度、高效率和高可靠性需求,分析了飞机装配过程几何量检测特征和具体的检测要求,提出了用于不同测量任务的测量方法,构建了装配几何量质量检测体系。研究了复杂装配现场多源异构整体测量工艺仿真及精度优化、三维点云数据的拟合与对齐和基于整体测量场的多系统协同测量3项关键技术,开发了装配检测质量管理平台,实现了检测数据管理信息化,为后续装配提供数据支撑,同步提升了飞机装配过程质控能力。

关键词: 飞机装配; 装配质量; 几何量检测; 工艺仿真; 协同测量

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.024



邢一新

高级工程师,研究方向为先进飞机制造技术。

数字化制造是现代化高端飞机制造技术发展方向,对提高整机质量、确保飞机性能、缩短生产周期、降

低生产成本、延长服役周期等均具有重要意义。数字化几何量检测已经成为新一代飞机数字化制造重要基础支撑技术之一。新一代飞机隐身、轻质、长航时、低成本和长寿命等性能需求,特别是隐身性能需求,对飞机装配精度提出了极高要求。直尺、卡尺、塞尺、卡板、量规等传统检测手段难以满足新一代飞机装配过程需求。另外,传统飞机装配过程遵循“定性检测、事后检验”<sup>[1]</sup>的检测模式,也已无法满足新一代飞机高精度装配质量控制要求。针对新一代飞机装配过程质控要求,开展几何量质量检测体系构建及关键技术研究具有重要意义。

精密检测是确保飞机装配质量最为直接的保障手段之一,飞机装配过程中涉及的检测内容与方法众多,

主要分为3类<sup>[2]</sup>: (1)几何量的检测,即产品形状及位置的测量; (2)物理量的检测,即装配力、变形量、残余应力、质量特性等的检测; (3)状态量的检测,包括产品装配状态、干涉情况、密封性能等的检验。其中,飞机装配过程几何量检测是最为关键的内容,直接影响飞机气动外形、组部件准确度和表面质量控制,进而影响飞机气动性能和隐身性能。

近年来飞机装配几何量检测技术取得了重要进展,检测精度与效率得到了大幅度提高<sup>[3]</sup>。检测方法主要包括接触式检测和非接触式检测。接触式检测方法在产品三维几何估计<sup>[4]</sup>、检测点的分布和数量<sup>[5]</sup>、分步式检测方法<sup>[6]</sup>等方面取得了重要突破。针对非接触式测量方法,国内外学者提出了众多新的模型与算法,

\* 基金项目: 国防基础科研(JCKY2018205B005); 国家自然科学基金(51805502)。

如基于知识的视觉理论模型<sup>[7]</sup>、基于深度学习的视觉识别<sup>[8]</sup>和单目视觉检测<sup>[9-10]</sup>等。正是由于上述技术的突破,装配过程几何量检测设备不断推陈出新,精度、稳定性、通用性等技术指标不断提高,极大地拓展了数字化检测技术在飞机装配领域的应用。波音、空客、洛克希德·马丁等国外航空公司已经普遍采用数字化检测设备进行产品三维检测与质量控制,开发并形成了飞机产品三维检测规划与数据分析体系,制定了数字化三维检测技术规范,形成了完整的数字化检测技术体系<sup>[11]</sup>。此外,检测设备与工艺装备的深度融合成为装配技术发展的重要趋势。诸如激光跟踪仪等测试设备广泛应用于F-35、A400M、A350等先进飞机的总装对接中。在F-35的中后机身对接中,洛·马公司基于激光跟踪仪设计制造的自动化、模块化工装,使用激光三角传感器精确调整钻头位置并测量钻孔尺寸<sup>[12]</sup>。

本文针对新一代飞机装配几何量检测需求,详细梳理目前飞机装配几何量检测特征,提出新一代飞机装配几何量检测体系构建方案,并对其关键技术进行了详细分析。

## 新一代飞机装配过程几何量检测需求分析

新一代飞机气动外形先进、隐身性高,装配过程必须同时关注局部关键特征和整机外形精度。飞机装配涉及组部件关键交点与特征点、全机水平测量点、表面质量特性、气动外形检测等一系列质控问题。为提高飞机装配质量,确保整机产品性能,利用先进测量技术和方法进行装配过程控制和最终几何特征与设计要求的一致性检测是现代飞机数字化制造的一项重要内容。飞机几何特征的多样性、装配流程的复杂性以及装配的高协调性要求,对飞机装配过程提出了不同测量需求,本文主要从

空间点位测量和三维外形测量两方面进行介绍。

### 1 空间点位精度检测

飞机装配过程中,需要将工装和零部件上的某些特征点作为质量评价关键要素,通过测量工具获取三维坐标数据并进行精度评价。常见的应用有以下4种。

(1) 组部件装配关键特征点检测。

在飞机装配过程数字化、自动化技术背景下,在组部件装配阶段,大型结构件常以自身为基准进行装配定位,如梁、框、肋等构件利用装配孔、槽等特征实现自定位,减少装配工装定位器使用,使工装简单化、通用化。自定位特征通常多选用构件“K”孔(定位基准孔)、交点孔、叉耳端面等,在飞机装配过程中,这些特征均需严格控制,特征点的检测精度控制优劣直接影响组部件装配质量。

(2) 部件对合点检测。

在飞机总装过程中,采用数字化柔性对接工装是提高对接精度和效率的有效手段。在部件对合过程前后,需要测量各部件上已标记出的对合装配控制点,将测量数据传递给对合平台计算分析,计算分析系统将实测值与理论值进行匹配分析,得到部件位姿偏差,进而将位姿偏差反馈给控制系统,驱动对合平台定位器调整部件姿态并完成自动对合。为提高对接效率,有效提高装配对接精度,对合过程中需要进行实时动态引导,部件到位后再进行坐标精确测量和定位精度确认。

(3) 水平测量点检测。

水平测量是飞机装配过程中的综合性检测环节,表征飞机装配各部件相对位置安装精度,是飞机装配质量及安全性的关键判据。传统的飞机水平测量在全机调平的前提下,利用水准仪与标尺等配合进行高度方向基准测量,利用铅锤、卷尺等对飞

机水平测量点进行检测,再将各测量数据向飞机坐标系投影计算各部件安装角度,通过与水平测量公差进行比对评价飞机装配质量。因传统的基于模拟量的测量工具精度较低,测量过程需要人工参与,测量误差大,测量效率低,实施过程复杂。随着大空间激光技术的不断发展,激光跟踪仪和工作空间测量定位系统(Workshop measuring and positioning system, wMPS)得到了广泛应用,无需进行飞机触屏操作,可直接获取水平测量点三维坐标,自动化程度高,测量精度与效率均得到大幅提高。但需要强调的是,随着飞机性能对气动外形、表面工艺要求越来越高,传统基于离散坐标的水平测量评价方式已经无法满足目前测量需求,引入三维高分辨率点云技术进行整体评价已经成为新一代装配技术发展的必然方向。

(4) 工装关键功能点实时监测。

装配工装关键功能点的定位精度直接影响飞机装配质量与可靠性。传统的装配过程定期检测工装关键功能点状态以保障装备对接精度。在定检周期内,并无有效方法进行实时监控,导致部件装配不协调时有发生,产生装配质量问题。工装关键功能点实时监测是确保装配全过程稳定可靠的必要手段。通过借助wMPS测量系统,将光电接收器放置在待监测点,长时间连续实时记录关键功能点空间位置,进而评价位置一致性与稳定性。

### 2 飞机复杂外形形貌测量

飞机外形形貌检测是质量评定的另一项重要内容。飞机部件尺寸大,制造精度要求高,外形曲面复杂,表面光滑度和波纹度要求高,对三维形貌测量精度和效率提出了挑战。传统的飞机装配过程中,依据装配型架上的外形卡板用塞尺等进行外形测量,测量手段落后,测量精度低,难以进行全面的品质评定。同时,随

着飞机性能要求的提高,对飞机表面质量的要求也在不断提高,如铆钉钉头的凸凹量、蒙皮对缝间隙与阶差等与表面质量相关的要素均需要进行严格的控制。以某型号飞机为例,基本外形偏差最大为  $\pm 3.0\text{mm}$ ,最小为  $+0.4\text{mm}$ 、 $-0.6\text{mm}$ ,蒙皮对缝间隙的最大允许值为  $1.5\text{mm}$ ,最小值为  $1.0\text{mm}$ ,阶差(包括顺航向和垂直航向)的最大允许值为  $1.2\text{mm}$ ,最小值为  $0.3\text{mm}$ ;而不同区域中沉头螺栓(螺钉)头凸凹量的极限偏差最小仅为  $0.15\text{mm}$ 。对于普通的测量手段而言,难以精确地显示测量结果,通常采用简单定性的方式给出结论。

此外,新一代飞机高隐身特性的要求、某些关键部位的特殊设计和制造工艺对其装配过程检测技术提出了新的挑战,如整机气动外形和进气道外表面的检测等。进气道是隐身战机的一个重要组成部分,进气道隐身性能优劣决定着新一代飞机能否满足隐身设计要求。新一代飞机采用“S”进气道,进气道结构复杂,开敞性极差,不利于在飞机装配过程中对进气道表面质量进行在线检测。同时,新一代飞机进气道对缝间隙和阶差检测精度要求进一步提高。以“S”进气道为代表的飞机复杂狭窄内腔表面检测对测量设备提出了更

高的要求。

传统的飞机表面质量检查方法采用传统人工抽检方式进行,完全依托检验人员的经验,采取目视检查方法,选取表面质量接近超差位置,利用塞尺对表面质量质疑位置进行抽检,进气道的表面质量检测位置有限,并未实现进气道的全覆盖,并且对缝间隙与阶差检测结果受检验人员自身影响较大,无法满足装配质量检测要求。四代机装配表面对缝间隙与阶差要求全覆盖,即对缝间隙与阶差要求每  $150\text{mm}$  设置 1 个检测点,其中目视可见明显阶差/间隙或曲率较大的蒙皮对合处,应增加 2~3 个测量点,表面对缝间隙与阶差检测工作量相比三代机大幅度增加。另外,传统的以塞尺为代表的检测工具分辨率较低,检测效率、检测精度、抗干扰性等均无法满足四代机装配质量评估要求。

随着飞机数字化柔性装配的发展,数字化测量系统开始大规模地应用于飞机装配中。常用的数字化测量系统主要有关节臂测量机、摄影测量系统、激光跟踪仪、激光雷达和室内空间测量系统等。各测量系统性能对比分析如表 1 所示。其中,激光跟踪仪、激光雷达和室内空间测量系统具有相对精度高、测量范围大的优

点,可用于工装安装、部件装配定位、对接装配及装配质量检测等生产环节,是实现飞机数字化柔性装配的主要测量工具。关节臂测量机和摄影测量系统具有体积小、便于携带的优点,可用于某些特定装配质量检测指标的检测或与辅助精密测量设备进行协同测量。

## 新一代飞机装配几何量质量检测体系构建

针对飞机装配过程检测对象复杂、组部件数量众多、检测精度要求高等特点,基于现有测量技术设备,构建了飞机装配几何量检测体系,该体系侧重于装配检测质量管理平台开发和集成,以解决飞机装配过程检测数字化与自动化程度低、车间管理技术手段落后等问题。由于飞机装配测量本身是复杂的跨尺度测量问题,单一设备无法在测量范围、测量分辨率方面同时满足测量需求,因此飞机装配几何量质量检测是各种测量设备的综合运用过程,需要各个工艺流程通盘考虑,根据上述测量需求和现有设备测量性能特点,提出了飞机装配几何量质量检测体系总体架构,如图 1 所示。

飞机装配几何量检测体系主要包括对象层、设备层、软件层及企业

表 1 不同测量系统性能对比分析

Table 1 Performance comparison of different measurement systems

原理	系统	量程/m	精度(MPE)	优点	缺点
单站球坐标测量	激光跟踪仪	$\leq 80$	$15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$	信息多样、动态性能好	接触测量、自动化程度较低
	全站仪	$\leq 300$	$0.5\text{mm}/30\text{m}$	自动化程度高、成本低、恶劣环境适用	单任务
	激光雷达	$\leq 50$	$10\mu\text{m}/\text{m}$	非接触、点云测量、速度快、自动化程度高	难以测量单点
多站长度交会测量	laserTRACER-NG	$\leq 10$	$0.25\text{mm}/30\text{m}$	动态性能好	环境要求高
	经纬仪	$\geq 0.6$		非接触、恶劣环境适用	自动化程度低
多站角度交会测量	V-STARS 系统	可扩展	$4\mu\text{m}+4\mu\text{m}/\text{m}$	非接触、点云测量、速度快、数据量大、便携性强、环境适应性好	自动化程度低
	iGPS 系统	可扩展	$200\mu\text{m}+10\mu\text{m}/\text{m}$	多任务并行、实时、动态、自动测量	接触测量
	wMPS 系统	可扩展	$200\mu\text{m}/\text{m}$	多任务并行、实时、动态、自动测量	接触测量

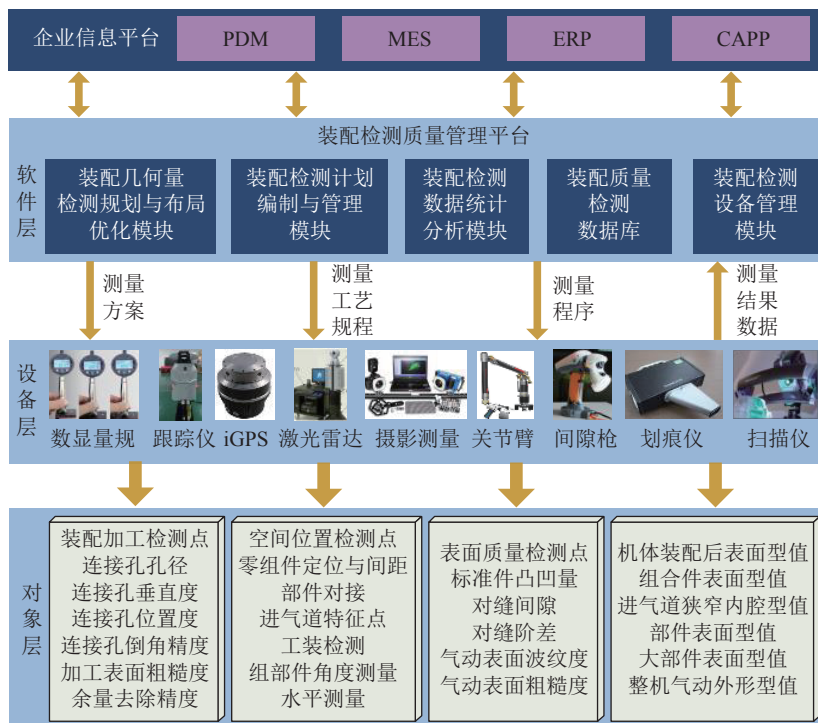


图1 飞机装配几何量质量检测体系总体架构

Fig.1 Framework of aircraft assembling geometrical quality inspection system

信息平台。对象层包括飞机装配全过程待测几何量特征。设备层协调管理各类空间三维测量设备,通过融合多源测量系统协同完成全局与局部测量任务。软件层则实现测量数据的收集、整理、融合、比对、分析等功能,结合产品尺寸公差等设计标准生成分析报告。企业信息平台负责接收质量管理平台的输出数据及改进建议反馈。

装配检测质量管理平台输入数据来自两个方面:一是数字化工艺平台的装配工艺过程、装配模型、尺寸公差、测量目标和基准(模型上);二是现场装配车间测量设备(由iGPS和下属激光跟踪仪、关节臂、扫描仪等组成)的测量结果数据。装配检测质量管理平台输出数据去往3个方面:一是将测量系统配置方案、测量工艺规程(脚本)和测量程序输出到装配车间现场,以便构建测量系统(场)、驱动测量仪器系统,指导工人测量操作;二是将采集的测量结果数据进行数据处理和分析后,

以统一测量数据集的形式反馈给数字化工艺平台,包括产品检测数据、装配工装检测数据、工序件检测数据和工序件夹具检测数据;三是根据测量数据的分析结果,将有关产品关键特征/特性、尺寸公差的可测量性分析报告及改进建议反馈数字化工艺平台。

### 1 面向不同检测要素的检测方法分析

飞机装配过程几何量检测对象多样、涉及的测量与检测方法及其工具各异,需要根据检测对象具体要求合理匹配检测设备。依据装配过程的检测特征,从检测精度、检测成本、检测效率和检测可靠性4个维度,对装配过程检测特征与检测设备匹配,匹配关系见表2。针对装配过程中的不同检测特征,利用装配检测计划编制与管理模块生成检测规划方案,最终完成不同装配特征的检测。

### 2 装配检测计划编制与管理模块

装配检测计划编制与管理模块实现了检验计划编制、更改、审查、

发布等功能,装配检测计划定版流程如图2所示。该模块是以PPR(.CATProcess格式)文件为载体,并存储检测信息,同时需满足检测计划管理、升版、维护及检测工艺设计等要求。通过装配质量检测平台与企业内部工艺系统互联互通,该模块可查询MBOM结构、工艺分工及各种工艺资源库。在对上述信息分析的基础上,策划装配检测方案和针对不同检测对象选用不同检测设备。该模块可随时查询装配工艺编制进展和状态,当装配工艺规程编制完成后,将数据推送给检测人员,检测人员利用相关工艺信息、产品模型信息和资源模型信息,针对实际需要编制装配检测计划,插入检测工序或工步。

装配检测计划对应的检验工步,存储于PPR文件中Process节点下,并保持与装配工艺规程文件(包含版本信息)、装配工艺工步节点的关联关系。装配检测计划相关信息以数据库记录的形式进行存储,当在

CATIA 中进行三维装配检测规程信息的表达时,以自定义的数据文件格式及数据结构为载体,动态加载,保证信息的实时有效。模块涉及三维组部件信息,从 LCA 系统中获取,并进行轻量化处理后,在三维装配检测规程中显示和加载。对于历史版本的装配检验规程,该模块通过审签流程控制,保留所有历史数据和必要的更改说明信息以供追溯。对于以有效性为关键字的查询,使用最新版有效原则进行管理。

### 3 装配质量检测数据管理与分析模块

装配质量检测数据管理与分析模块实现了关键过程数据、点云数据、单点数据的信息采集及统计分析功能,根据数据特征,能够生成直方图、箱线图、控制图等,装配质量检测数据管理与分析模块架构如图 3 所示。

表 2 装配过程检测特征与检测设备匹配关系

Table 2 Mapping of assembling inspection features and equipments

检测对象分类	检测特征	检测方法
装配加工检测点	连接孔孔径 连接孔垂直度 连接孔位置度 连接孔倒角精度 铤窝深度精度 加工表面粗糙度 加工余量去除精度	孔径数显卡规、窝深数显卡规、垂直度数显卡规、粗糙度仪
装配空间位置检测点	零组件空间位置与间距 部件对接关键特征点 进气道特征点 工装检测 组部件角度测量 水平测量	激光跟踪仪、iGPS、激光雷达、关节臂测量机、双相机测量、工业摄影测量
表面质量检测点	标准件凸凹量 对缝间隙 对缝阶差 气动表面波纹度 气动表面粗糙度	凸凹量检测量规、间隙枪、划痕仪、粗糙度仪
机体装配后表面型值	组合件表面型值 进气道狭窄内腔型值 部件表面型值 整机气动外形型值	激光雷达、扫描仪、iGPS、摄影测量、多测量手段融合

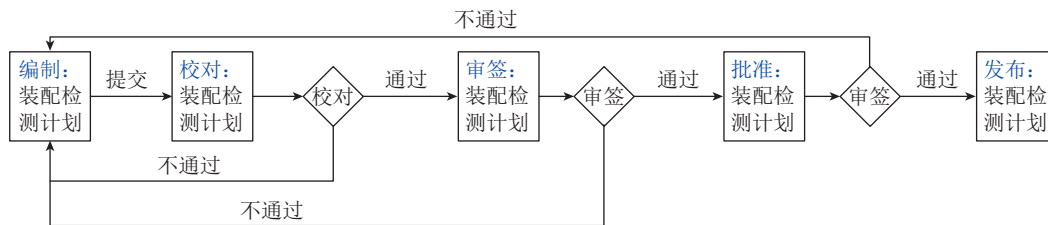


图 2 装配检测计划定版流程

Fig.2 Flow path of assembling inspection plan

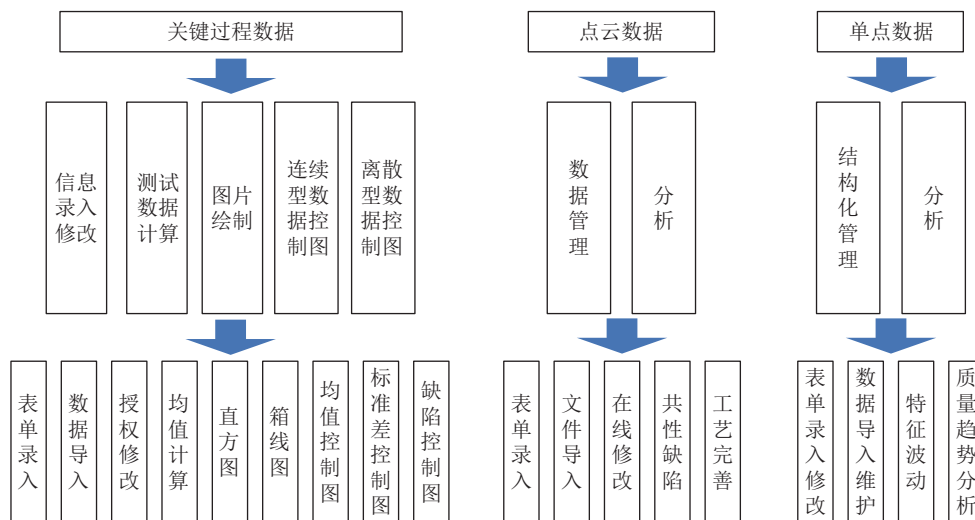


图 3 装配质量检测数据管理与分析模块架构

Fig.3 Framework of management and analysis module for assembling quality inspection data

在关键过程数据分析方面,对于其他系统数据,支持以固定格式导入。根据统计结果实现对测量数据均值和方差计算,并对数据进行过滤和选择,依据相应出图条件生成分析图表。针对连续型数据,绘制均值控制图、单值控制图;针对离散型数据,绘制缺陷率控制图等。技术人员可对统计结果进行筛选与剔除,可对筛选与剔除后结果进行分析,绘制控制图,统计和分析结果可以表格及文档等形式输出。该模块具有错误信息修改功能,即由于人为等原因,导致录入的信息有误,需要重新录入的情况。错误信息修改只能由原信息录入者进行修改,其他操作人员只有查看信息权限。

在点云数据管理与分析方面,统计出的点云数据于检测报告中体现,同时对相应产品的点云数据进行编号、上传等管理。云数据、检测报告与被测产品一一对应,存储于数据库。

在单点数据管理与分析方面,能够与其他信息系统集成,对于其他系统的数据,支持以固定格式导入。相关数据信息既可手动录入,亦可导入基于固定模版的格式数据。对于单点数据该模块实现了单件产品理论值与实际测量值数据的结构化管理。

## 飞机装配过程几何量检测关键技术

### 1 复杂装配现场多源异构整体测量工艺仿真及精度优化

针对航空数字化制造现场大空间、高精度、多信息、低成本以及高效可靠的测量需求,深入分析多源异构整体测量网络所面临的精度、效率问题,通过完成基于三维空间误差分析的测量数据评估及精度优化方法、基于产品数模的多源异构整体测量网络误差仿真方法和面向复杂装配现场的多站整体测量网络智能优化算法的研究,最终搭建基于数模的通用

精度分析模块。

异构网络坐标测量中,被测目标的坐标由来自多个测量单元(系统)的测量信息合成,这一过程称为测量数据融合。各测量系统的测量数据均在其自身坐标系下获得,将测量数据融合细分为测量单元的坐标系统一和被测量目标的坐标解算两个步骤。现有网络化测量技术在测量信息的处理方式上为异构网络提供了重要的借鉴意义。依靠冗余测量信息,同步完成多个测量单元的坐标系统一及多个被测目标的坐标解算,不仅避免了因多次坐标系转换造成的不确定度累计,而且充分利用了冗余测量信息,有助于提高解算精度及鲁棒性。

测量的过程,即是测量不确定度传递的过程,对其进行准确量化和正确表达,是异构网络精度分析的具体表现,不仅保证了异构网络测量结果可靠性,还为异构网络的仪器选型、布局优化提供了重要依据。基于现有多源测量数据融合解算原理,分别基于 GUM 法和蒙特卡洛方法实现了异构多站网络坐标不确定度的统一分析与表达,构建了单点测量数据有效性评价方法。面向真实产品数模综合现场遮挡、环境等影响因素构建接近真实测量状态的误差仿真理论体系。同时,由于异构测量网络涉及多个测量系统,传统的面向多系统的专用测量软件无法满足仿真及测量需求。构建了用于异构测量网络不确定度分析的仿真及测量平台,引入神经网络等智能算法、计算机图形学标准三维模型物理仿真算法,从仪器有效测量区域、视线遮挡、测量精度及成本 4 方面描述了异构网络测站类型、数量、布局综合优化等问题。

分析归纳了大尺寸坐标测量系统的不确定度来源,建立了仪器测量坐标不确定度及其测量范围的通用描述模型,基于单点空间误差分析结

果构建单次测量数据测量有效性评价方法,并以测量系统的校准结果或历史测量数据设计先验权值,实现了多几何量融合坐标测量精度的动态优化。

### 2 三维点云数据的拟合与对齐技术

点云数据拟合与对齐通常采用两种方式进行,一是应用点云数据分析模块中的最佳拟合对齐方式,该方法是基于最小二乘原理,通过匹配同名点,将转站残差最小化,获得点云数据匹配的最佳结果;二是基于关键特征点的点云配准,通过在产品上识别高精度定位特征,对点云数据添加几何约束条件,使获取的点云数据转换至测量坐标系下,从而实现最优点云匹配。飞机装配制造过程中,零件结构复杂多样,形貌结构多变、尺寸跨度大,部分零件无法识别出可对点云数据进行完全约束的关键特征信息。通过对拟合原理进行深入研究,结合大量工程试验,对于无法实现完全约束的产品,提出了一种最佳拟合方式与基于特征的拟合方式相结合的融合拟合方式,获得最佳的拟合效果。首先利用部分高精度特征对点云数据进行初始约束,排除无效点云数据的干扰,在初始约束的基础上将有效点云数据与产品标准三维模型进行最佳拟合(基于最小二乘法)。经工程化对比试验验证,以上 3 种拟合方式的综合应用可覆盖不同产品特征的数字化检测,拟合方式与产品特征匹配关系见表 3。

### 3 基于整体测量场的多系统协同测量技术

以大部件对接和整机外形检测为代表的部装、总装过程产品尺寸较大(5~20m),结构复杂,被测特征多样,测量“跨尺度”特点突出,需要将测量过程与工艺紧密结合。在现有测量条件下,没有任何单一测量设备能够整体满足上述测量需求,将现场大空间远距离整体测量

表3 组部件装配检测特征与拟合方式匹配关系

Table 3 Matching of parts set assembling inspection features and fit method

组部件装配检测特征	拟合方式
无明显特征且组部件与数模外形一致	最佳拟合
具有高精度明显特征(包括人工构建)	基于特征拟合
零件与数模差别较大且无明显特征	融合拟合方式

定位和有限空间近距离高精度、高分辨率形貌数据获取相结合构成跨尺度组合测量系统,是唯一可行的解决手段。相比于传统跟踪仪单站测量,以室内GPS、多相机测量网络为代表的多站整体测量网络可通过增加测量单元数目、改变单元类型或调整单元布局在不损失精度的前提下满足不同尺度空间覆盖要求,适应不同测量条件,可作为实现飞机数字化装配现场整体测量的基础设备,但还需结合各个系统优势特点,解决设备间接口、系统同步、数据配准及数据融合问题,构造精度统一的最优系统。

本文提出一种基于室内GPS全

局定位,同时融合摄影测量、蓝光三维扫描、光电校靶等多设备作为测量终端的跨尺度组合测量系统,实现了室内GPS系统与视觉测量系统的精确协同,建立了满足部装总装测量需求的组合测量方法。通过前期分析仿真设计,针对不同待测几何特征、不同工艺流程,提出个性化视觉测量方案,同时采用兼顾精度、效率、量程的室内GPS多站整体场实现全局精度控制,在测量终端集成wMPS接收器实现终端定位。测量终端可根据待测特征及测量需求灵活选择视觉形貌测量设备、结构光轮廓测量设备等完成点、面等几何特征高精度测量。针对全局测量

场校准,通过wMPS发射端及接收端改进提升了硬件性能。通过激光干涉测长及多边形定位方法构建了用于整体测量场全局定向和精度补偿的高精度控制场,进一步提高了全局测量精度,提高了跨尺度协同测量系统的整体性能,建立了满足总装测量需求、现场可用的高精度多源异构整体测量网络,具体实施技术路线如图4所示。

## 结论

飞机装配几何量高精度测量是新一代飞机装配过程质量保证的重要手段。几何量测量方法的不断发展为新一代飞机装配技术发展带来了变革。通过开展装配几何量质量检测体系构建及关键技术研究,开发了装配检测质量管理平台,实现了检测数据管理信息化,通过准确、高效的算法对检测数据进行分析,并将检测分析结果反馈飞机装配过程,形成基于检测的装配过程闭环控制,为后续装配提供数据支撑,同步提升了飞机装配过程质控能力。

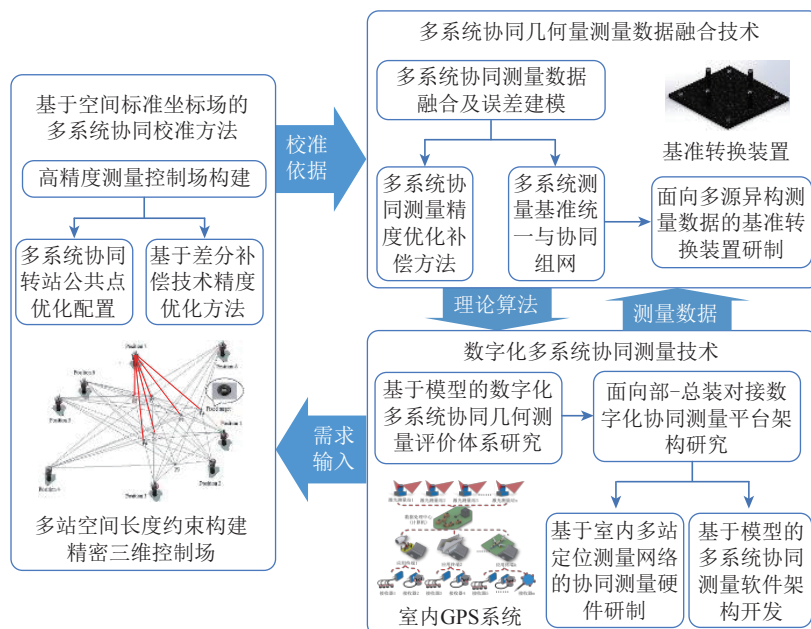


图4 基于整体测量场的多系统协同测量技术路线图

Fig.4 Multi-system synergy measurement technical line based on overall measurement field

## 参考文献

- [1] 韩志仁. 大飞机数字化制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(1/2): 53-57.
- HAN Zhiren. Key technology for digital manufacturing of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(1/2): 53-57.
- [2] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.
- LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.
- [3] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
- GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.
- [4] LI Y, GU P. Geometric estimation of 3D machined parts for internet based manufacturing system[C]//Proc. CIRP Conf. Workshop, Hong Kong, 2002.
- [5] WOZNIAK A, MAYER J R R. A robust method for probe tip radius correction in coordinate metrology[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(2): 025001.
- [6] BÉARÉE R, DIEULOT J Y, RABATÉ P. An innovative subdivision-ICP registration method for tool-path correction applied to deformed aircraft parts machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(5-8): 463-471.
- [7] LOWE D G. Three-dimensional object recognition from single two-dimensional images[J]. Artificial Intelligence, 1987, 31(3): 355-395.
- [8] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Image net classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
- [9] 黄风山, 钱惠芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. 光电工程, 2007, 34(4): 69-72.
- HUANG Fengshan, QIAN Huifen. Single camera 3D coordinate vision measuring system using a light pen[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(4): 69-72.
- [10] 闵新力, 万德安, 张剑. CCD双目视觉测量系统结构参数设置的理论研究[J]. 机械设计与制造, 2001(3): 54-56.
- MIN Xinli, WAN Dean, ZHANG Jian. Theoretical study on structural parameters setting of CCD binocular vision measurement system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2001(3): 54-56.
- [11] 张开富. 飞机装配过程数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 34-40.
- ZHANG Kaifu. Digital measuring technique in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 34-40.
- [12] 刘亚威, 任晓华. 未来飞机装配工厂的典型场景[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 54-56.
- LIU Yawei, REN Xiaohua. Typical view of future aircraft assembly factory[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 54-56.

通讯作者: 邢一新, E-mail: 459280590@qq.com.

## Research on Establishment and Key Techniques of Aircraft Assembling Geometric Measurement System

XING Yixin

(AVIC Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

**[ABSTRACT]** The assembling of the new generation aircraft is characterized by high precision, high efficiency and high reliability. By considering the characteristics, the demands of geometric measurement during assembling are analyzed and the measurement system is established. Three key techniques are accomplished. The first one is multi-source heterogeneous whole-body measurement process simulation and accuracy optimization technique. The second one is 3D point cloud data fitting and aligning technique. The third one is multi-system collaboration and cross-scale measurement technique based on whole-body measurement field. The aircraft assembling quality management platform is then developed. The measurement data management informatization is also achieved. The techniques and measurement system will offer data support for the following assembly work and improve the quality controllability of assembling process.

**Keywords:** Aircraft assembly; Assembling quality; Geometric measurement; Process simulation; Synergy measurement

(责编 雷松)