

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.04.05

大型复杂结构装配多系统协同精密测量技术与平台

侯国义^{1,2}, 赵子越^{2,3}, 李润润⁴, 孙安斌^{2,3}, 李泂杲^{1,2}, 黄翔^{1,2*}

(1.南京航空航天大学, 江苏 南京 210016; 2.航空制造计量与测量数字化联合技术中心, 北京 100095;
3.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; 4.中航成飞民用飞机有限责任公司, 四川 成都 610091)

摘 要: 传统数字化测量方法存在测量场构建效率低、多设备协同性差等不足, 难以满足新一代飞机大型复杂结构高精度、批量化的测量与装配需求。针对上述问题, 开展多系统协同精密测量技术研究, 建立大尺度测量场不确定度解析模型并提出自适应规划方法。研制多模式基准转换标准器, 提升协同测量场构建精度, 同时提出基于轻量化模型与任务-设备协同的测量规划技术, 实现多站位、多任务的自动化序列生成与仿真优化。在此基础上, 开发集多设备控制、测量规划、数据管理分析于一体的大型复杂结构装配多系统协同精密测量平台, 实现装配测量过程“模型-规划-测量-分析”的闭环控制。开展试验对该平台的性能进行测试, 结果显示: 该平台显著提升了测量精度与效率, 为推动航空领域大型复杂结构精准测量与装配技术发展提供了有力支撑。

关键词: 飞机装配; 大型复杂结构; 数字化测量; 多系统协同; 多设备控制; 轻量化模型; 测量场构建; 测量规划

中图分类号: TB92; V21; V262.4 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2026) 04-0067-26

Multi-system cooperative precision measurement technology and platform for large-scale complex structure assembly

HOU Guoyi^{1,2}, ZHAO Ziyue^{2,3}, LI Runrun⁴, SUN Anbin^{2,3}, LI Shuanggao^{1,2}, HUANG Xiang^{1,2*}

(1.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2.Digital Joint Technology Center for Aviation Manufacturing Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 3.AVIC Beijing Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 4.AVIC Chengdu Commercial Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: Conventional digital measurement methods suffer from low efficiency in measurement field construction and poor coordination among multiple devices, which cannot satisfy the high-precision and batch measurement and assembly requirements for large complex structures of new-generation aircraft. To address the above limitations, this paper investigates the multi-system collaborative precision measurement technology, establishes an uncertainty analytical model for large-scale measurement fields, and proposes an adaptive planning method. A multi-mode datum conversion standard artifact was developed to improve the construction accuracy of collaborative measurement fields. Meanwhile, a measurement planning technology based on lightweight models and task-device collaboration was put forward to realize the automatic sequence generation and simulation optimization for multi-station and multi-task measurement. On this basis, a

收稿日期: 2025-08-26; 修回日期: 2026-02-23; 录用日期: 2026-03-02; 发表日期: 2026-08-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52205474); 国家“十四五”民用飞机专项项目(MJZ2-4N21(2)); 中央高校基本科研业务费项目(56XCA240310)

引用格式: 侯国义, 赵子越, 李润润, 等. 大型复杂结构装配多系统协同精密测量技术与平台[J]. 计测技术, 2026, 46(4):67-92.

Citation: Hou Guoyi, Zhao Ziyue, Li Runrun, et al. Multi-system cooperative precision measurement technology and platform for large-scale complex structure assembly [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(4):67-92.



multi-system collaborative precision measurement platform for the assembly of large complex structures was developed, which integrates multi-device control, measurement planning, and data management and analysis, achieving closed-loop control of the assembly measurement process covering "model-planning-measurement-analysis". Comparative experiments were conducted to verify the platform performance. The test results demonstrate that the proposed platform remarkably improves the measurement accuracy and efficiency, providing strong technical support for advancing the precise measurement and assembly technology of large complex structures in the aviation industry.

Key words: aircraft assembly; large complex structures; digital measurement; multi-system collaboration; multi-device control; lightweight model; measurement field construction; measurement planning

0 引言

飞机机身、机翼、机头等大型复杂结构通过分离部件相互对合并装配而成,装配特征测量准确性和效率直接影响质量,进而决定产品性能^[1-2]。数字化测量凭借其快速、高准确性的优势已取代传统模拟量测量,广泛应用于大型复杂结构装配领域^[3-4]。

大型复杂结构装配具有工艺复杂、工位分散、特征多样等显著特点。以C919机头部段为例,其属于飞机一级气动外形区域,尺寸为6 400 mm × 4 000 mm × 4 000 mm,装配测量过程涵盖总装集成、组件对合、组件装配(驾驶舱、机轮舱、壁板、舱门等组件)等多个复杂场景,测量空间为几米至十几米,测量内容包括波纹度、水平、蒙皮外形/端面、活动部件交点孔、舱门外形/对缝等10余类共128项任务。机头部段装配数字化检测的核心对象是装配特征,需要根据几何机构、特征表达形式、容差要求等匹配合适的数字化测量设备与相应的测量工艺,在测量工艺驱动下实现多样特征和多源测量设备的集成化、自动化、有序性与协作性测量。采用多系统协同精密测量技术是保证机头部段装配高精度与高效率的关键。

目前的数字化测量方法仍以人工操作激光跟踪仪、激光雷达、室内GPS等单系统测量为主,现场测量设备布站高度依靠人工经验,使用多台套测量设备进行复杂部段测量时,人工操作缺乏合理的测量规划,不同测量精度异构数据缺乏融合方法,不同设备系统间协作性差,导致测量效率极低,已成为阻碍大型复杂结构精准高效装配的“卡脖子”问题^[5]。因此,迫切需要突破以高精度、高效率、高协同为特征的大型复杂结构装配

多系统协同精密测量技术。

在多系统协同精密测量技术的理论研究层面,基于关键特性的测量辅助装配技术能够实现测量过程集成和数据融合,在降低制造成本的同时提高效率^[6-7];大尺寸测量场构建技术可以提供基准点布设与测量场不确定度分析方法^[8-9];多源异构系统组网测量技术可以为多系统组网测量、数据融合提供指导^[10-11];全方位自动化测量技术、集成化的测量系统能够提高测量精度与装配效率^[12-13]。

在多系统协同精密测量技术的工程应用层面,天津大学的科研人员自主研发了室内空间测量定位系统(workshop Measuring and Positioning System, wMPS),在大尺寸测量转站^[14]、大部件对接调姿^[15]等方面均取得成功应用。南京航空航天大学与上海飞机制造公司的科研人员深入研究室室内GPS、激光跟踪仪和视觉测量系统的组网测量,成功解决了ARJ21翼身对接的多特征测量问题^[16]。北京航空航天大学 and 长春理工大学的科研人员分别将室内GPS与便携式扫描仪、激光雷达联合,构建了大型构件自动化扫描系统^[17]和大部件对接调姿测量系统^[18]。浙江大学的科研人员利用激光跟踪仪的多站测量实现飞机水平检测与附件装配校准^[19],大连理工大学的科研人员将激光跟踪仪、激光扫描系统、工业机器人和移动平台相结合,实现了某大型航天器舱段外形扫描^[20]。

上述研究成果为推动多系统协同精密测量技术的发展提供了重要借鉴,但目前仍然缺乏满足新一代飞机大型复杂结构高精度、批量化测量与装配需求的多系统协同精密测量平台,此类平台需要满足以下三个层次的“协同”内涵要求^[21]:

1) 系统级协同

为完成某一测量任务,采用多系统共同测量

获取测量数据,以提高测量精度和效率。

2) 数据级协同

为充分利用多系统测量数据,通过多源数据融合手段,合理给出测量结果及其精度评价。

3) 现场级协同

结合测量对象对测量系统与控制系统进行多系统集成控制,实现产品全生命周期内的有效信息管理,达到测量控制管理一体化。

针对上述问题,本文将大尺度测量场高精度构建、三维测量模型构建、协同测量任务规划与测量仿真、数据融合分析等关键技术相结合,构建包含三维可视化平台、测量设备、辅助装置的集成化系统,实现大型复杂结构装配场景下上述三个层次的协同测量,为新一代航空设备大型复杂结构高精度、批量化测量与装配提供技术支撑。

1 大型复杂结构装配多系统协同精密测量需求

图1为飞机大型复杂结构装配多系统协同精密测量技术的实现路径,它是一条包含基础构建、核心规划、系统集成化实现的清晰路径。首先通过大尺度测量场的高精度动态构建,为多设备协同建立统一可靠的空间基准;进而以轻量化模型与任务驱动的数字化规划为核心,实现测量过程的智能化与最优化;最终,所有技术被集成于一个功能完备的协同测量平台中,通过对硬件设备的统一调度与数据流的融合分析,将先进的理论方法转化为现场的高效实践,系统性地解决传统测量模式的效率低、协同性差、数据一致性不足等核心瓶颈,为新一代飞机的高质量、智能化装配提供关键技术支撑。

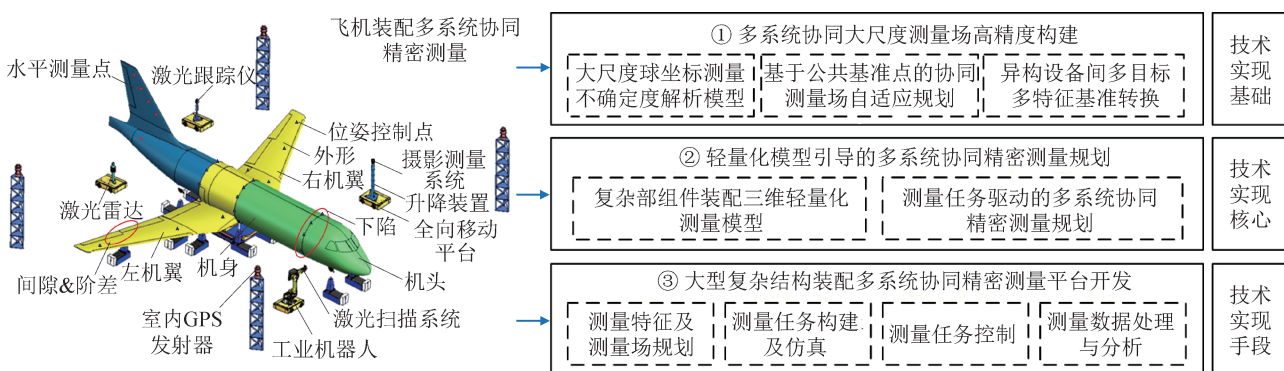


图1 飞机大型复杂结构装配多系统协同精密测量技术实现路径

Fig.1 Multi-system collaborative precision measurement: conceptual framework for assembly of large-scale complex aircraft structures

大型复杂结构装配多系统协同精密测量的具体需求如下。

1.1 大尺度测量场构建需求

大型复杂结构尺寸大、曲面形状复杂、精度要求高,单一设备难以兼顾大空间测量精度与范围,必须采用多设备多站位协同测量技术^[22],而测量场是大空间协同测量的基础,其作用是将不同站位、不同设备的测量数据通过公共基准点拟合,实现测量坐标系高精度转换^[23]。但是,传统的大尺度基准点布设方法完全依赖人工经验,构建精度评价指标单一,且不确定度评估效率极低。因此,需在被测特征容差、测量精度、空间遮挡、转换误差等约束下,突破多系统协同大尺度测量场高精度构建技术^[9, 24]。

1.2 数字化协同测量规划需求

大型复杂结构装配形-位特征在位测量易受被测特征尺寸、光照环境、结构开敞性等影响,人工经验引导的测量模式会产生大量冗余数据,无法用于后续质量分析^[25];三维理论模型零部件数量庞大、测量干扰特征多、测量辅助信息集成度低,无法直接用于引导数字化协同检测^[26-27];不同检测场景下可能存在多个检测任务,同时需要多种测量设备协同作业,完全依靠操作人员经验进行测量规划,极易出现任务冲突,设备利用率极低且难以保证测量稳定性。因此,需攻克轻量化模型引导的多系统协同精密测量规划技术难题^[28]。

1.3 多系统协同测量平台需求

协同测量平台是实现多系统统一调度与数据

融合的核心载体^[29-30]，其作用是通过集成化的总控系统、标准化的数据接口与智能化的算法模块，实现对异构测量系统与辅助装备的协同规划、控制与数据分析^[31-32]。传统的多系统测量应用依赖人工经验进行任务规划、设备布站与数据处理，缺乏系统性协同机制，导致测量效率低、数据一致性差。因此，需在测量精度、设备性能、空间遮挡、流程协同等约束下，突破面向飞机智能化装配的多系统协同测量平台构建技术，实现从测量规划、场站构建、过程控制到数据融合的全流程协同^[33-34]。

2 多系统协同大尺度测量场高精度构建

多系统协同大尺度测量场高精度构建是精密测量实现的基础与保障，其主要包括球坐标测量系统不确定度评估、协同测量场自适应规划与异构设备高精度基准转换等，即通过建立快速准确的不确定度分析模型，融合基准点布设规划与精度分析，实现精度约束的测量基准布设，并通过基准转换标准器实现不同设备间的数据融合分析^[9, 35-36]。

2.1 大尺度球坐标测量不确定度解析模型构建

测量场构建的主要内容是通过激光跟踪仪、激光雷达等大尺度球坐标数字化测量系统，在大型复杂结构装配现场布设用于测量与转站的基准点[基准工具球点(Tooling Ball, TB)和增强系统参考点(Enhanced reference system point, ERS)]，基准点布设不确定度直接影响测量场精度。传统测量场构建采用蒙特卡洛方法评估布设不确定度，但是随着飞机部组件结构尺寸的不断增大，采样点数量指数级上升，传统方法评估效率较低，且未考虑天顶角等影响，导致不确定度估计显著偏大。针对此问题，本文提出一种基于微分几何的面向大尺度空间测量场不确定度评估的椭球解析模型^[24]，以进一步提升基准点布设的精度和不确定度评估效率。

如图2所示，假设 r 为设备原点到 P 点的距离， α 为方位角， β 为天顶角，测量坐标系(Measurement Coordinate Systems, MCS)中任意空间测量点 $p(x, y, z)$ 为

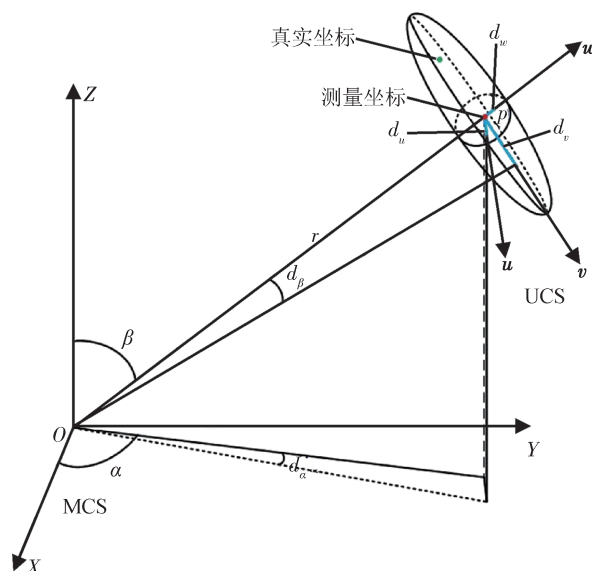


图2 球坐标测量系统不确定度椭球模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of uncertainty ellipsoid model for spherical coordinate measurement system

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha \sin \beta \\ y = r \sin \alpha \sin \beta \\ z = r \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

由于测量中距离和角度的不确定，测量点会与真实值间存在椭球形的不确定度域，构建不确定度椭球坐标系(Uncertainty Ellipsoid Coordinate System, UCS)，各轴在MCS中的单位矢量为

$$\begin{cases} \mathbf{u} = [\sin \alpha & -\cos \alpha & 0]^T \\ \mathbf{v} = [\cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \sin \alpha & -\sin \beta]^T \\ \mathbf{w} = [\sin \beta \cos \alpha & \sin \beta \sin \alpha & \cos \beta]^T \end{cases} \quad (2)$$

MCS和UCS间的转换矩阵 ${}^M_U\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R}_U^M = [\mathbf{u} \quad \mathbf{v} \quad \mathbf{w}] \quad (3)$$

假设在UCS的 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{w}$ 轴上分别存在由距离和角度测量传感器产生的偏差 d_α 、 d_β 和 d_r ，有数学关系 $d_u = r \sin \beta d_\alpha$ 、 $d_v = r d_\beta$ 、 $d_w = d_r$ ，对应的距离和角度测量不确定度为 σ_r 、 σ_α 、 σ_β ，则不确定度椭球的各轴 U_u 、 U_v 、 U_w 可表示为

$$\begin{cases} U_u = r \sin \beta \sigma_\alpha \\ U_v = r \sigma_\beta \\ U_w = \sigma_r \end{cases} \quad (4)$$

由于 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{w}$ 轴正交，不确定度椭球在UCS中可表示为 $\mathbf{D}_{pp}^U$ ，即

$$D_{pp}^U = \begin{bmatrix} U_u^2 & 0 & 0 \\ 0 & U_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & U_w^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

不确定度椭圆在 MCS 中可表示为 D_{pp}^M , 即

$$D_{pp}^M = R_U^M \cdot D_{pp}^U \cdot (R_U^M)^T \quad (6)$$

2.2 基于公共基准点的协同测量场自适应规划

基于基准点布设不确定度解析模型, 在测量特征分类、特征测量精度要求、空间遮挡、异构系统基准转换器位置等约束下, 构建协同测量场自适应规划模型, 是有效降低测量场不确定度, 提高测量场适应度的核心和关键^[25]。

首先, 识别并剔除存在粗差的永久基准点, 同时在基准缺失区域引入基准转换器, 以精度精准控制为目标, 构建仅考虑基准配准误差的目标优化函数 F_1 , 即

$$F_1 = \min f(p_1, p_2, \dots, p_N) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_i \|p_i - {}^k p''_i\|^2 / (\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N a_i) \quad (7)$$

式中: f 为最小二乘函数; p_N 为某站位中的第 N 个 ERS 点测量坐标; K 为站位总数; p_i 为第 i 个 ERS 点的测量坐标; ${}^k p''$ 为依据测量不确定度加权融合的测量坐标; a_i 为等于 0 或 1 的参数, a_i 等于 1 表示第 i 个基准在第 k 个站位可以测得。

姿态特征、形貌特征、连接特征和定位特征的几何参数解算方法、公差形式和测量精度约束各不相同, 将几何参数解算方法、公差形式、测量精度的目标函数分别记为 f_1 、 f_2 、 f_3 , 表示为

$$f_1(p_1, p_2, \dots, p_N) = \sum_{i=1}^N U_{p_i} / N \quad (8)$$

$$f_2(p_1, p_2, \dots, p_N) = \max\{U_{p_i}\} \quad (9)$$

$$f_3(p_1, p_2, \dots, p_N) = \sum_{i=1}^m \max(0, Q_{ii}) \quad (10)$$

式中: U_{p_i} 为第 i 个 ERS 点的配准不确定度, Q_{ii} 为公差要求。

根据式(7)~式(10), 可推导得到协同测量场自适应规划的优化模型, 即

$$\min f(p_1, p_2, \dots, p_N) = f_1 + f_2 + \beta f_3 = \sum_{i=1}^N U_{p_i} / N + \max\{U_{p_i}\} + \beta \sum_{i=1}^m \max(0, Q_{ii}) \quad (11)$$

在给出测量场自适应规划理论模型后, 由于

基准要求布设于地面、工装等固定位置, 部件、工装等遮挡会造成设备无法测量到 3 个及以上基准, 从而导致建场失效。如图 3 所示, 可行空间由装配特征部件空间 S_1 、测量设备最佳观测空间 S_2 和地面、测量站位等构成的操作空间 S_3 组成, 为此, 构建基准位置可行布设空间 F_s 模型, 即

$$F_s = (S_2 \cap S_3) - S_1 \quad (12)$$

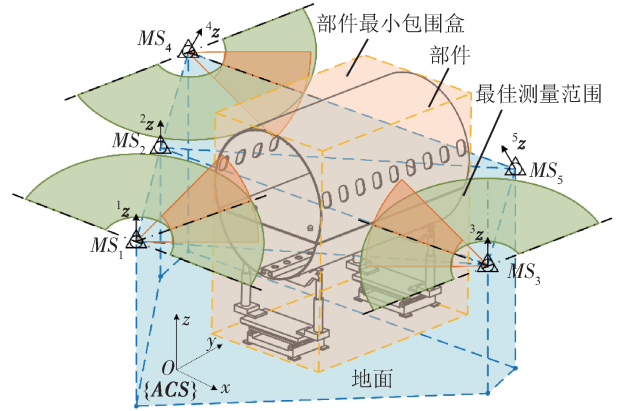


图3 测量场基准点可行布设空间构成示意图

Fig.3 Schematic diagram of feasible deployment space composition for measurement field reference points

基于改进离散二进制粒子群算法优化增强基准和基准转换器布设位置和数量, 与永久基准点共同构成全局装配基准系。

最后, 以上述基准自适应规划和空间布局优化模型为基础, 结合文献[29]中推导的基准点布设与测量双侧误差方程, 即式(13), 构建大尺度装配多系统协同测量场统一转换模型, 如式(14)所示。

$$D_{p_i p_i} = {}^k a_i D_{\xi' \xi'} {}^k a_i^T + {}^k R^0 D_{p_i p_i} {}^k R^{0T} = {}^k a_i D_{\xi' \xi'} {}^k a_i^T + ({}^k R^0 {}^k J_i^*) {}^k A_i ({}^k R^0 {}^k J_i^*)^T \quad (13)$$

式中: $D_{p_i p_i}$ 为特征点装配坐标系下的方差-协方差矩阵, $D_{\xi' \xi'}$ 为转换误差的方差-协方差矩阵, ${}^k R^0$ 为测量坐标向装配坐标转换矩阵, $D_{p_i p_i}$ 为测量误差的方差-协方差矩阵, ${}^k J_i^*$ 为雅可比矩阵, A_i 为测量容差矩阵。

$$A^T D_{vv}^{-1} (A \Delta \xi - L) - B^T D_{ss}^{-1} (H - B \Delta \xi) = 0 \quad (14)$$

式中: A 为布设矩阵, 反映 ERS 点在装配坐标系的分布情况; D_{vv}^{-1} 为对称矩阵; $\Delta \xi$ 为全局参考系下坐标转换修正参数; L 为站位内所有 ERS 点布设坐标与粗变换后测量坐标的差值矢量; B 为系数矩阵;

D_{ss}^{-1} 为对称矩阵； H 为公共基准点在测量坐标系下的偏差矩阵。

$\Delta\xi$ 可表示为

$$\Delta\xi = (A^T D_{vv}^{-1} A + B^T D_{ss}^{-1} B)^{-1} (A^T D_{vv}^{-1} L + B^T D_{ss}^{-1} H) \quad (15)$$

2.3 异构设备间多目标多特征基准转换

异构测量设备测量精度各异、测量过程相互独立、转换数据偏差大，在局部特征装配精度约束下，需要研制面向不同测量系统的基准转换标

准器^[37]，如图4、图5所示。平面基准转换标准器由基板组件和姿态调整架组件组成。基板组件用于安装两种测量基准：一种是工具球基准；另一种是配合基准，可与销定位目标或球型定位目标适配。四面体基准转换标准器是1个具有4个基座的正四面体装置，基座可以安置适配于不同球坐标数字化测量设备的靶标，如激光跟踪仪的猫眼逆反射器、激光雷达的光面反射球、摄影测量系统的哑光反射球等。

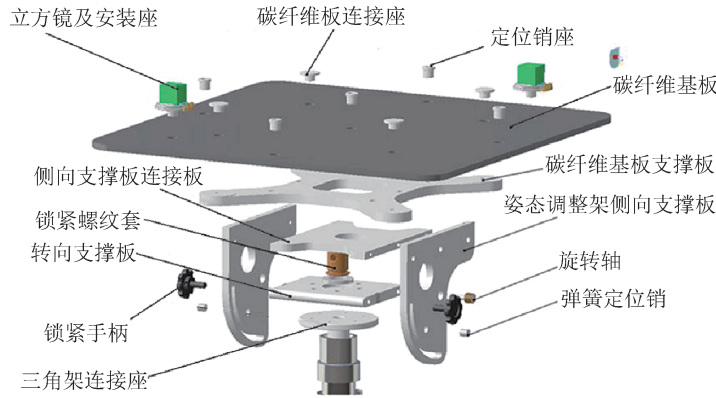


图4 平面基准转换标准器

Fig.4 Planar base reference transformation standard

根据四面体基准转换器任意两个靶标中心之间的距离相等和平面基准转换器任意定位特征间的标定值，即可完成协同测量场下多源测量数据向装配全局坐标系的高精度转换融合。

式(16)为文献[29]给出的距离交汇系统和角度交汇系统联合的优化模型，配合基准转换标准器即可完成多源异构系统数据的统一优化。

$$\xi' = (A^T D_{EE}^{-1} A + C^T D_{mm}^{-1} C + H_3^T D_{E_3 E_3}^{-1} H_3)^{-1} (A^T D_{EE}^{-1} L + C^T D_{mm}^{-1} S + H_3^T D_{E_3 E_3}^{-1} L_3) \quad (16)$$

式中： ξ' 为优化后的坐标转换修正参数， D_{EE}^{-1} 为对称矩阵， C 为测量误差系数方程矩阵， D_{mm}^{-1} 为对称矩阵， H_3 为公共基准点转换后的测量误差线性方程矩阵， $D_{E_3 E_3}^{-1}$ 为对角分块矩阵， S 为布设误差系数方程矩阵， L_3 为所有测量点的距离矩阵。

2.4 测量场构建分析验证

2.4.1 球坐标测量不确定度解析模型仿真验证

使用Leica AT901-LR激光跟踪仪(测量不确定度 $\sigma_\alpha = 1 \text{ arcsec}$ ， $\sigma_\beta = 1 \text{ arcsec}$ ， $\sigma_r = 10 \mu\text{m} + r \times 0.5$

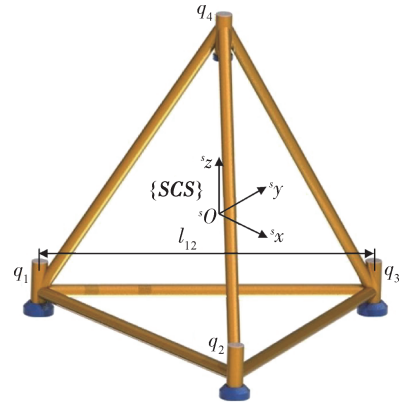


图5 四面体基准转换标准器

Fig.5 Tetrahedral reference frame transformation standard

$\mu\text{m}/\text{m}$)对空间三点进行300次测量(测量角度分别为 $\alpha = 90^\circ$ ， $\beta = 90^\circ$ ； $\alpha = 90^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$ ； $\alpha = 45^\circ$ ， $\beta = 45^\circ$ ；测量距离为5 m)。其中，三点绝对坐标位置分别为(0, 5 000, 0)、(0, 3 546, 3 546)、(2 500, 2 500, 3546)，单位为mm，获得针对三点的分散点云，同时根据前述构建的不确定度椭球模型，将实测散点和理论椭球绘制于图6。

由图6可知，解析模型能够基本包络所有测量散点，表明基于该模型预测的测量点不确定度分布可较为准确地表征实测数据的不确定度。

2.4.2 协同测量场自适应规划仿真验证

图7为某飞机翼身对接多源协同测量场景，装配特征包括位姿控制点、交点孔和蒙皮外形。机翼位姿控制点位于下翼面。测量规划中，机身蒙皮外形由两个站位激光雷达测量，机翼蒙皮外形所用自动扫描系统在仿真中不予考虑，机身与机翼位姿控制点由三台激光跟踪仪测量，交点孔在机翼远离机身时由激光跟踪仪测量(仅研究装配特征的转换误差，忽略测量误差)。具体容差及允许

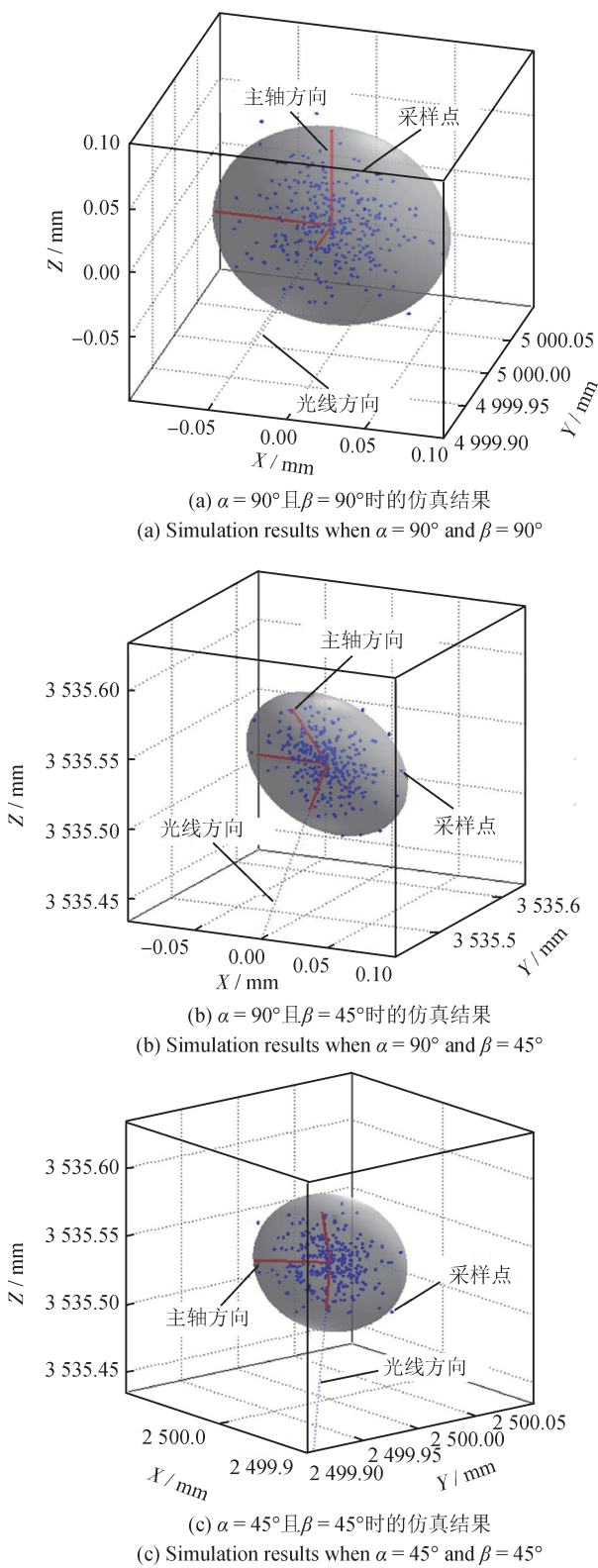


图6 测量不确定度解析模型仿真结果
Fig.6 Simulation results of the measurement uncertainty analytical model

系数见表1,特征的最大转换不确定度允许值等于容差值×允许系数。

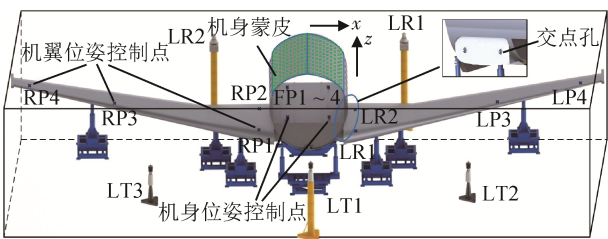


图7 某型飞机翼身对接测量需求
Fig.7 Measurement requirements for wing-to-fuselage alignment of an aircraft model

表1 装配特征容差及允许系数
Tab.1 Tolerance and allowable coefficient of assembly features

装配特征	离散点	容差/mm			允许系数
		x	y	z	
机翼位姿控制点	LP1/RP1	± 0.5	± 0.5	± 0.5	0.1
	LP2/RP2	± 0.5	± 0.5	± 0.5	0.1
	LP3/RP3			± 5	0.1
	LP4/RP4	± 5	± 7		0.1
机身位姿控制点	FP1 ~ FP4	± 0.5	± 0.5	± 0.5	0.1
交点孔	孔心		± 0.05		0.5
机身蒙皮外形	形面控制点		± 1.0		0.1

在测量中,假设ERS点的各向布设误差均为± 0.01 mm,考虑到激光跟踪仪(型号为AT901)和激光雷达(型号为MV330)的测量范围较大,将其限制为包含测量设备、翼身结构的最小包围盒,最佳范围设定为2~8 m。设备测量坐标系到全局装配坐标系的转换参数如表2所示,其中, t_x 、 t_y 、 t_z 分别为x、y、z轴的平移参数, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为x、y、z轴的旋转参数。

当仅考虑翼身位姿控制点的相关要求进行测量场规划时(案例Ⅰ),需依据LT1~LT3三台激光跟踪仪进行ERS点布设。综合考虑影响连接质量的交点孔与位姿控制点(案例Ⅱ),即可得到另一种ERS点布设结果,具体布设网络结果如图8所示,案例Ⅰ和案例Ⅱ的ERS点位分别用红色原点 and 三角点表示,装配特征在对应ERS点布设下的坐标转换误差如表3所示。

表2 设备测量坐标系到全局装配坐标系的转换参数

Tab.2 Transformation parameters from the device measurement coordinate system to the global assembly coordinate system

测量设备	平移参数 / mm			旋转参数 / rad			缩放因子 μ
	t_x	t_y	t_z	ε_x	ε_y	ε_z	
LT1	3 406.692	6 997.610	184.759	0	0	0	1
LT2	-3 311.092	3 404.711	-1 582.866	0	0	0	1
LT3	10 178.618	3 491.777	-1 582.866	0	0	0	1
LR1	-634.294	-3 822.143	1 085.871	0	0	$\pi/2$	1
LR2	7 438.915	-3 825.361	1 085.871	0	0	$\pi/2$	1

表3 依据测量场布设ERS点进行装配特征坐标转换误差统计(案例 I 和案例 II)

Tab.3 Coordinate transformation error statistics for assembly features based on ERS point deployment (Case I and Case II)

装配特征离散点	案例 I 坐标转换误差最大值			案例 II 坐标转换误差最大值			单位: mm
	x	y	z	x	y	z	
机身位姿控制点 FP1、FP2、FP3、FP4	0.030	0.032	0.029	0.037	0.039	0.038	
机翼位姿控制点 LP1、LP2、RP1、RP2	0.031	0.036	0.032	0.034	0.030	0.032	
机翼位姿控制点 LP3、LP4、RP3、RP4	0.287	0.350	0.373	0.419	0.424	0.442	
交点孔 LC1、LC2、RC1、RC2		0.04			0.036		

案例 I 中,翼身位姿控制点均在测量场 ERS 点范围内,符合前述包容性要求,同时控制点转换误差均较低,最大误差为 0.373 mm(LP3、LP4、RP3、RP4),小于 0.5 mm 允许值;交点孔孔心最大误差达 0.040 mm,不符合容差要求。

案例 II 中,孔中心坐标转换误差虽有降低(0.033 ~ 0.036 mm),但仍无法满足 0.025 mm 的容差要求;位姿控制点不确定度略有上升,还在允许范围内。进一步仿真表明,ERS 点增至 18 个时,孔中心与控制点转换精度均满足要求。实际装配中更可行的方案是:重新规划测量站位使其靠近交点孔,并采用便携校准装置(如第 2.3 节所示)提升局部测量场精度。相较于案例 I,案例 II 的 ERS 点更邻近交点孔,且未能完整覆盖全部位姿控制点。该结果说明 ERS 点布局趋向于靠近高精度装配特征;对于包容范围以外的特征,经优化布局后依然能够满足精度指标要求,同时该结果验证了坐标转换不确定度在空间中的连续分布,

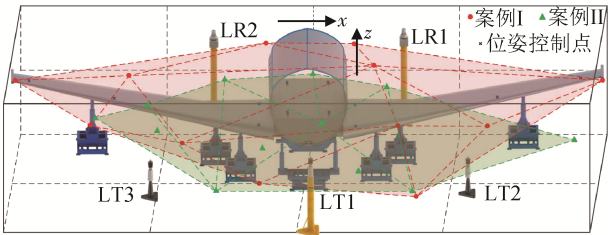


图8 测量场ERS点布设案例 I、案例 II
Fig.8 ERS point layout Case I and Case II in the measurement field

并随ERS点布局变化而改变。

当仅考虑机身蒙皮外形准确度时(如案例 III),需依据 2 台激光雷达布设 ERS 点。此条件下得到的布设网络结果如图 9 所示,对应装配特征坐标转换误差如表 4 所示。此时蒙皮外形控制点均在 ERS 点包容范围内,控制点最大误差为 0.052 mm,均满足允许误差要求。

当综合考虑表 1 中所列的全部装配特征精度要求时(如案例 IV),布设网络结果如图 9 中紫色空间

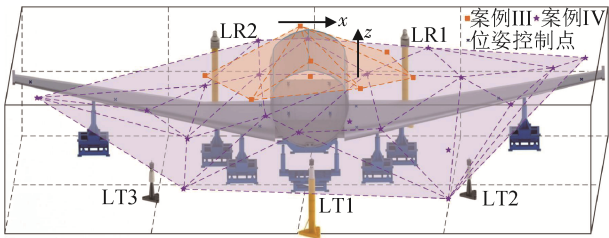


图9 测量场ERS点布设案例Ⅲ、Ⅳ
Fig.9 ERS point layout Cases Ⅲ and Ⅳ in the measurement field

包络范围所示。孔中心转换对应的误差区间为0.033 ~ 0.036 mm，超出表1的容差限值；其余各项特征均满足精度指标。表5所示为案例Ⅰ ~ 案

例Ⅳ中不同设备所能测量ERS点数目以及测量场中的ERS点总数目。由表5可知：测量场中的不同设备可观测ERS点数目之和均大于测量场中布置的ERS点总数，即部分ERS点往往可被不同的测量设备观测。图10所示为案例Ⅰ中具体的ERS点被测量设备的观测结果，激光跟踪仪LT1可观测到6个ERS点，LT2可观测到4个ERS点，LT3可观测到6个ERS点；其中，LT1和LT2可共同观测的ERS点为2个，LT1和LT3可共同观测的ERS点为1个。这表明自适应构建的测量场在满足装配精度的前提下，亦满足相关协同测量需求，即构建的测量场是协同测量场。

表4 依据测量场布设ERS点进行装配特征坐标转换误差统计(案例Ⅲ和案例Ⅳ)
Tab.4 Coordinate transformation error statistics for assembly features based on ERS point deployment
(Case Ⅲ and Case Ⅳ) 单位: mm

装配特征离散点	案例Ⅲ坐标转换误差最大值			案例Ⅳ坐标转换误差最大值		
	x	y	z	x	y	z
机身位姿控制点FP1、FP2、FP3、FP4				0.030	0.029	0.030
机翼位姿控制点LP1、LP2、RP1、RP2				0.030	0.034	0.031
机翼位姿控制点LP3、LP4、RP3、RP4				0.302	0.342	0.337
交点孔LC1、LC2、RC1、RC2					0.036	
机身蒙皮外表面控制点		0.052			0.055	

表5 测量场中的ERS点数目
Tab.5 Number of ERS points in the measurement field

案例	测量设备					总数/个
	LT1	LT2	LT3	LR1	LR2	
I	6	4	5			12
II	6	5	6			12
III				5	5	8
IV	6	6	6	4	4	20

3 轻量化模型引导的多系统协同精密测量规划

轻量化模型引导的多系统协同精密测量规划是提升测量数字化协同性与稳定性的核心，其主要包括部组件装配三维轻量化测量模型构建、测量任务驱动的多系统协同精密测量规划等，即通过将基准、设备、容差、精度等测量辅助信息集

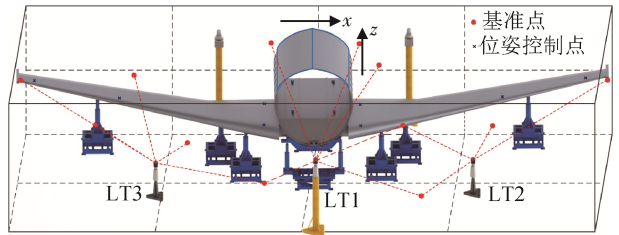


图10 测量场ERS点分布及被测量情况(案例Ⅰ)
Fig.10 Distribution and measurement of ERS points in the measurement field (Case I)

成于轻量化表达的三维模型，并依据不同工位下的测量任务需求，以精度和效率为优化目标，实现面向不同设备和多维任务的协同精密测量规划。

3.1 复杂部组件装配三维轻量化测量模型构建

测量模型依托CATIA软件环境，以结构树+轻量化模型结合辅助信息构建，主要包括测量几何特征轻量化和模型构建。

3.1.1 基于关键属性邻接图的测量特征轻量化

理论模型中不包含测点位置坐标信息,非测量特征的大量存在严重影响了模型读入与特征识别,因此必须对理论模型进行测量特征提取并删除冗余信息,生成可用于数字化测量的测点数据集。根据文献[38-39]的研究,测量特征轻量化总体思路如图11所示。

1) 三维模型拓扑信息提取

CATIA 模型可由 CGM(CATIA Geometric Modeler)记录建模拓扑和几何属性。CGM 中包含点、线、面、体等4类元素,元素个数、类型、关联关系等作为模型的拓扑信息,元素位置、约束条件等作为几何信息,元素间的交、并、补、距离等作为几何操作信息,共同组成了三维几何理论模型。图12为典型蒙皮模型拓扑结构树。

CATIA 为二次开发工具 CAA 提供了面向几何特征、信息、拓扑、数学公式4个维度的信息提取操作,但考虑到测量特征复杂、不规则,难以高效地利用特征提取接口进行计算,而数学公式多用于描述向量间的运算关系,因此,面向复杂曲面、复杂轮廓、孔位、指定位置的点位以及上述四类特征之间的装配关系等信息,采用拓扑结构

和几何信息操作接口,即可完成测量特征的自动提取。

2) 测量特征自动化识别

对于提取得到的点线面元素及其结构,需要进一步从其中提取出测量特征。由于测量与非测量特征间具有近似的拓扑结构和几何信息,需通过对组成测量特征的点线面元素添加附加属性信息的方法,来辅助识别过程。目前,属性邻接图 AAG(Attribute Adjacency Graph)的构建方法需针对待识别对象和整个模型进行完整定义,即待识别特征 AAG 是整个模型 AAG 的子图,通过设计适当搜索算法即可完成识别。因此,提出面向测量特征的关键属性邻接图 KAAG(Key Attribute Adjacency Graph)以定义针对不同特征的关键、附加属性等信息,通过不同属性的相互组合形式完成特征描述,进而完成识别。

图13为带外形、轮廓、下陷、孔位4种特征的蒙皮测量特征关键与附加属性标注结果。不同特征均有多条标注信息,每条属性针对的特征均具有不同描述权重,根据权重可将属性分为关键与附加属性(其中, S_{xx} 为关键属性, E_{xx} 为附加属性)。

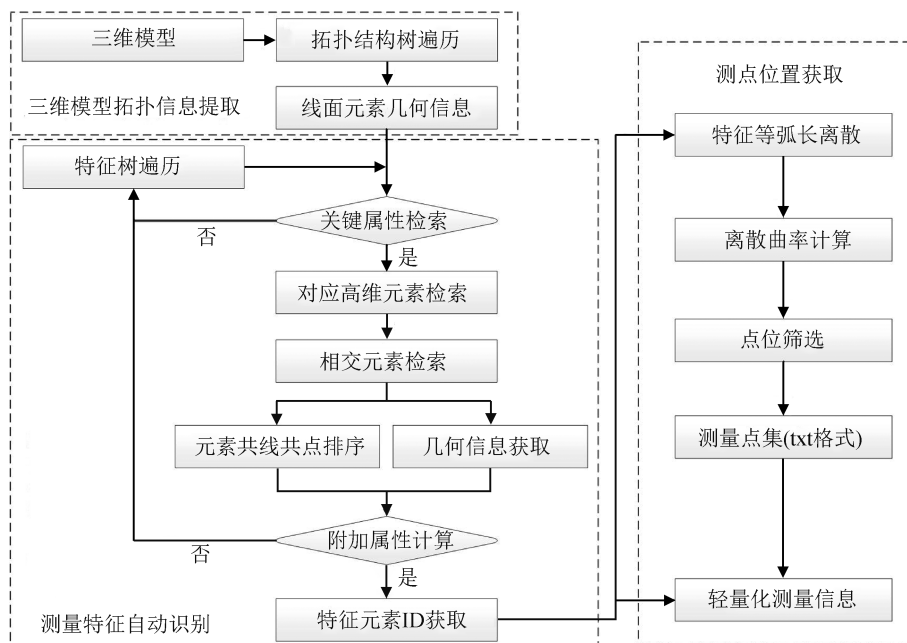


图11 装配测量特征轻量化技术路线

Fig.11 Lightweighting technical approach for assembly measurement features

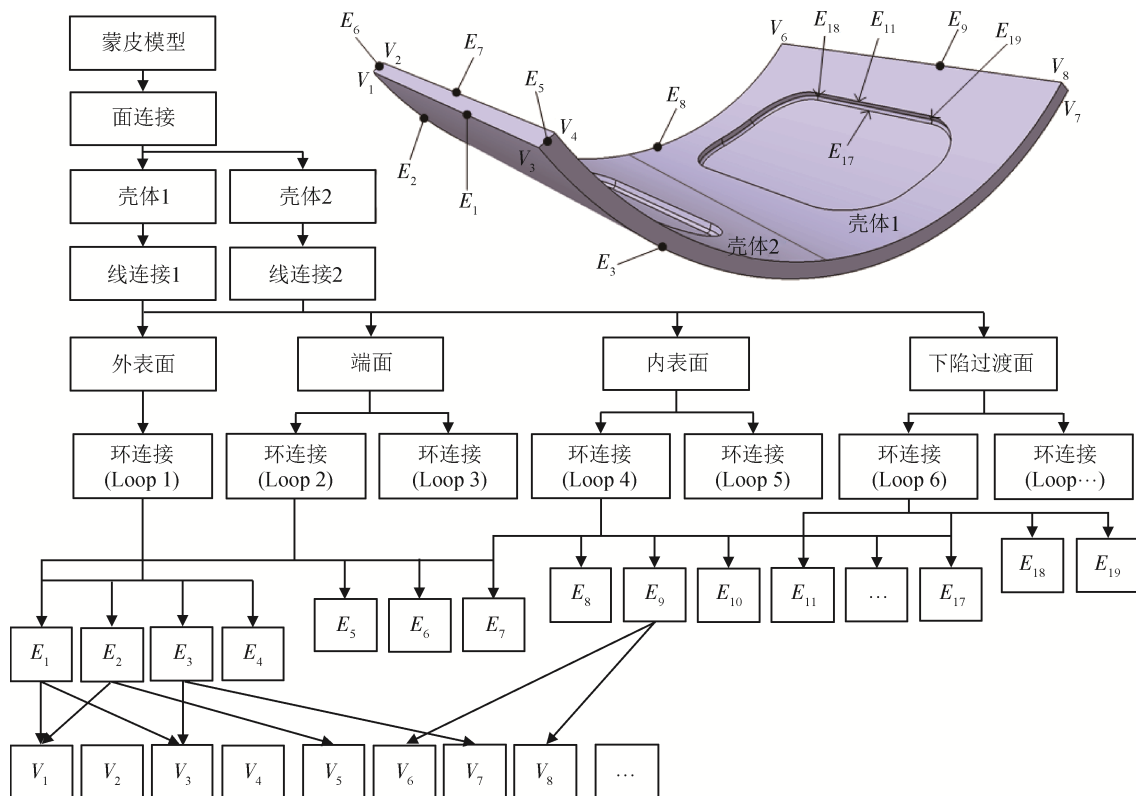


图 12 蒙皮三维数模拓扑结构树

Fig.12 Skinned 3D digital model topology tree

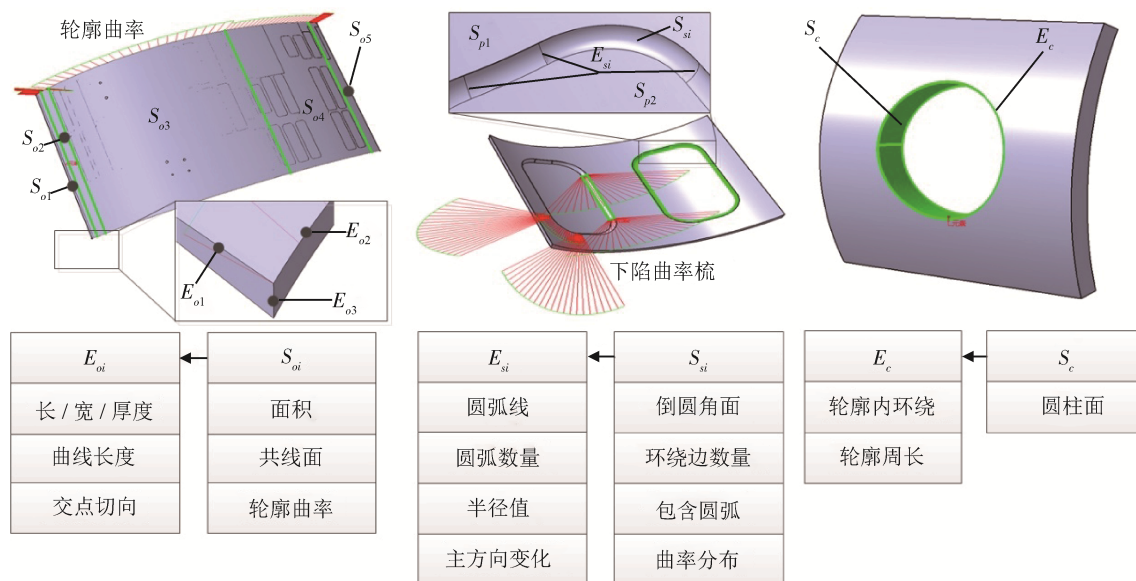


图 13 蒙皮测量特征属性标签

Fig.13 Skinned measurement feature attribute label

3) 测量点位置获取

复杂特征采样常使用均匀与自适应方法，其核心遵循 Kam^[40]提出的分解思想——通过曲面切割获取截面线采样。为实现采样的规则化，本文

提出分段采样与曲率筛选融合算法。蒙皮外形与外轮廓采样与筛选原理如图 14 所示。

① 基于属性标签检索拓扑结构树中的二维面集 S_i 及其轮廓边 E_i ，对非共线边独立等弧长离散

(弧长参数 $D_c \leq 30 \text{ mm}$, 可根据零件大小适当进行调整), 生成采样点 P_i , 此设计保留子轮廓边界点, 通过预分段提升效率; ② 求解各轮廓边 P_i 的离散曲率 K , 结合曲线连续性识别拐点/尖点/折痕点作为分段点。分段后按经验公式筛选采样距离 D_s (取离散曲率最大值 $K_{\max}$); ③ 以端面 S_e 切割曲面, 取共线边多数采样点构建截面线, 递归执行步骤②, 得到分割线采样点 Q_i 。

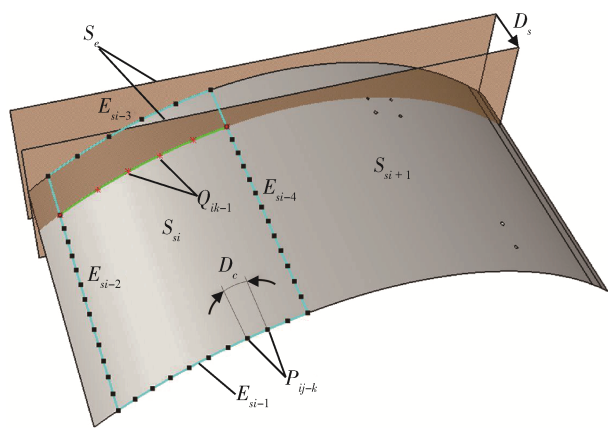


图 14 蒙皮外形与外轮廓采样与筛选原理

Fig.14 Principles of skin surface geometry and external contour sampling and screening

3.1.2 数字化协同三维轻量化测量模型构建

在模型轻量化并提取相关测量特征后, 将测量基准、公差、装配关系等信息基于 CATIA 环境集成于特征关联的几何特征集、标注集, 并将前述特征根据不同测量设备要求离散成有序测量点集, 进而形成三维轻量化测量模型^[26, 38]。其总体架构如图 15 所示。

1) 测量信息提取

待测特征提取提供基于几何类型、基于特征面积和基于边界尺寸 3 种方法。圆柱面与平面采用类型法, 内/外形面采用面积法, 边界轮廓采用边界尺寸法。误判特征可删除或更新。基准信息包括基准孔与基准面, 分别通过类型法和面积法提取。系统自动识别孔轴信息, 技术人员只需选择即可完成标注。

2) 测量信息标注

公差标注, 需将公差值与类型存入公差知识库。标注时, 系统根据特征名称自动从库中匹配

对应公差值及类型, 并按国家标准进行标注。如需修改, 支持对公差信息进行调整, 并提供产品公差标注界面及结果显示功能。装配关系匹配时, 需将零部件特征信息存入数据库, 输入零件编号等标识, 系统后台自动匹配, 结果显示于列表中, 确认后即可标注至特征与装配关系集中, 支持产品装配关系匹配与标注界面。

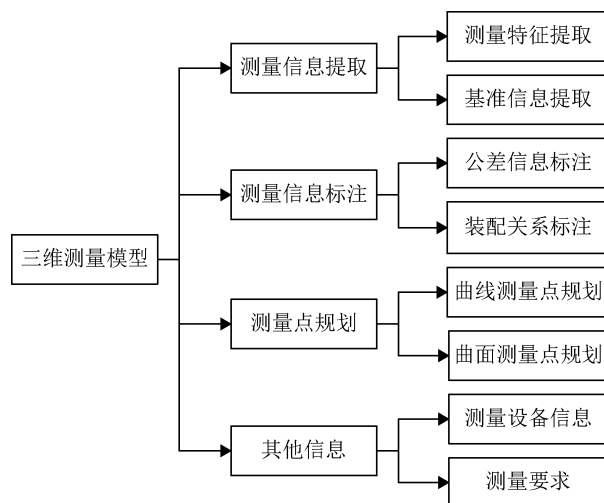


图 15 三维轻量化测量模型总体架构

Fig.15 Overall architecture of the 3D lightweight measurement model

3) 测量点规划

该模块需以待测特征、型值点初始距离、拟合精度阈值、离散精度阈值、公差值、测量点存储数据库路径等信息作为输入, 系统分析后根据不同测量设备需求生成测量点, 显示于三维模型并存入数据库。

4) 数据存储及报告输出

测量模型信息采用主从表结构存储, 主表存零件编号、名称等基本信息, 各从表分别存储理论/实际测量点、工装、设备和特征等信息。以零件编号、名称及特征名称等为主键, 建立三维模型与数据库之间的映射关系, 支持信息的双向修改与查询。系统可读取数据并整合输出测量模型报告(如 Excel、TXT、XML 等格式), 用于指导测量实施及数据处理。

以某型飞机翼盒后梁组件为例, 其三维测量模型如图 16 所示。

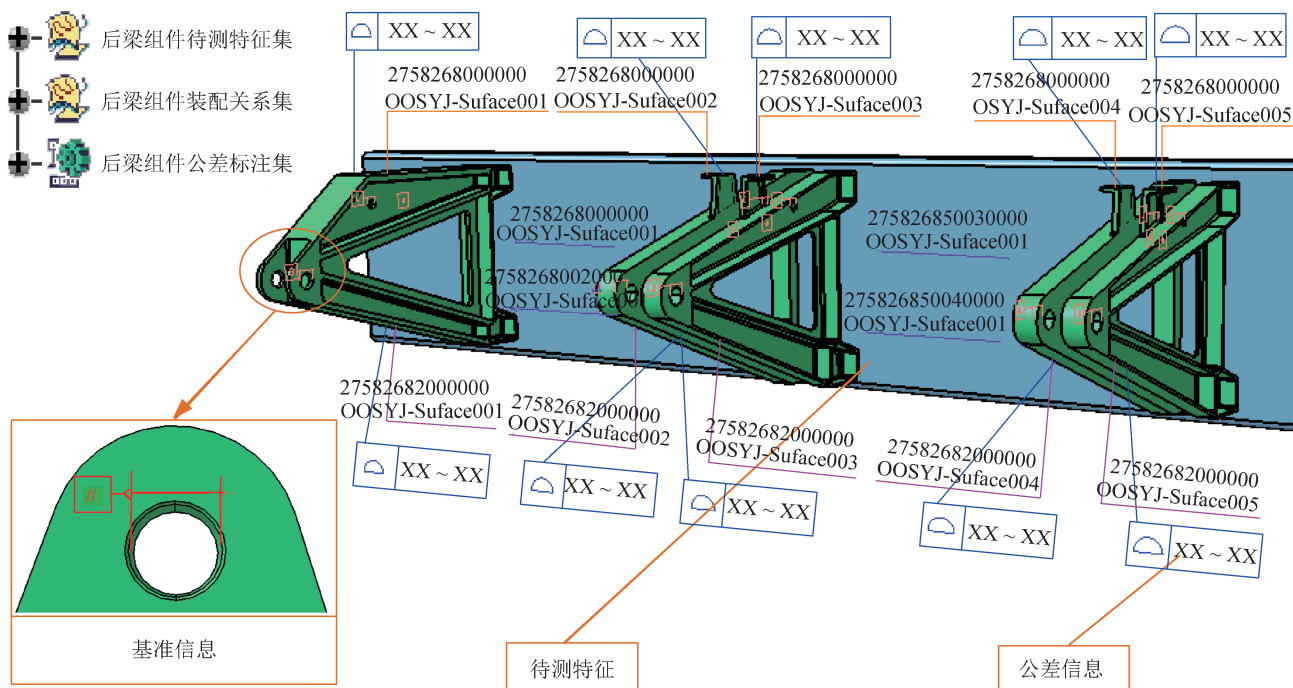


图 16 后梁组件测量模型

Fig.16 Rear beam assembly measurement model

3.2 测量任务驱动的多系统协同精密测量规划

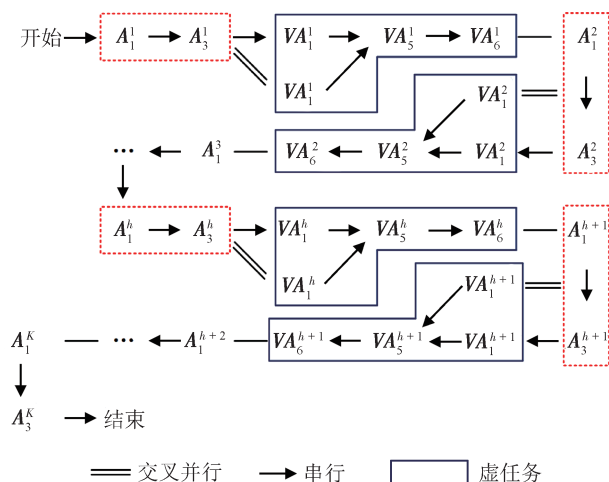
多系统协同测量规划主要包括多测量任务序列规划、多装配站位测量序列优化以及不同设备的协同测量仿真优化等。

3.2.1 基于任务相似性的协同测量序列预规划

基于任务相似性的协同测量序列预规划旨在通过量化测量任务间的相似性，实现高效聚类与序列优化。首先对测量任务进行数字化表达，提取测量特征、装配站位、设备、站位和基准等要素，并借助拉普拉斯核函数计算归一化相似度。随后，通过构建相似性矩阵并进行初等变换，将任务按装配站位划分，保证不同站位任务互不干扰。在同一站位内进一步聚类，以识别可并行执行的任务群，并依据相似性矩阵筛选串行与并行关系，构建多层级的任务集合。最后，通过关联相邻层级的任务集，引入虚任务作为映射节点，明确执行顺序与依赖关系，形成结构化的测量预序列，显著提升规划的效率和自动化水平。单装配站位下的测量序列简化如图 17 所示。

图 17 中， A 为测量任务集，下标代表串并行类型， h 为迭代层级； VA 为虚任务，其中， ${}^h A_1^h$ 为并行测量任务集； ${}^h A_3^h$ 为二级串行测量任务集；

${}^h VA_t^h (t = 1, 2, \dots, 6)$ 为虚任务节点，即测量任务映射，其作用为指向下一层级 ${}^h A_{t+1}^h$ 中的真实任务^[29]。



整体检测效率。首先构建“岛屿-城市-商店”层次化规划模型,将装配站位、任务集群与具体测量任务分别映射为岛屿、城市与商店,明确串并行关系与访问逻辑。以测量站位为主,引导构造章鱼优化算法的触角结构,建立禁忌表机制动态管理设备与基准资源状态,引入等待时间函数改进转移概率,以最小化总体测量时间为目标迭代优化单站测量序列(流程如图18所示)。最终,依据装配工艺将各站位优化序列进行整合,串行站位按时序衔接,并行站位则合并任务集重新聚类优化,形成全局协同测量方案。

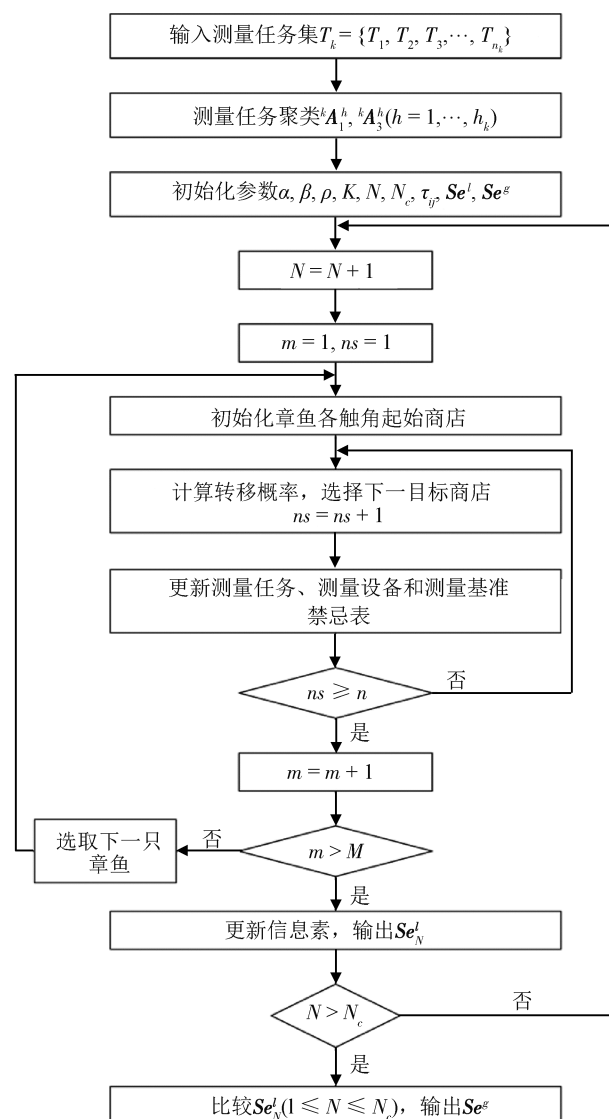


图18 基于章鱼优化算法的测量序列优化流程

Fig.18 Measurement sequence optimization process based on the octopus optimization algorithm

3.2.3 面向不同设备的数字化协同测量仿真与优化

飞机大型复杂结构的待测特征种类繁多,但可归为点、线、曲面三类。激光跟踪仪以高精度单点测量为主,需配合靶球,用于调姿控制点与水平测量点。激光雷达需预设坐标或区域引导,通过逐点扫描测量边界线与曲面。工业摄影测量需预先按规则均匀布设人工标志,主要用于型面测量。在测量任务规划后,即可面向不同设备进行测量仿真优化。

1) 激光雷达、激光跟踪仪站位仿真

采用基于区域生长算法的策略,以离散三角网格面片为单元,逐步聚合生成测量区域并确定站位。

首先,选取未分配区域的边角点作为生长种子,依据测量约束(如俯仰角、入射角和测量距离)反推可行站位,并通过迭代调整站位和区域范围直至稳定。接着,为进一步提高测量精度,引入测量不确定度作为优化指标,采用空间十字搜索法调整站位位置,以最小化点位的不确定度。最后,通过几何布尔运算进行静态干涉检测,确保测量光线不受部件或工装遮挡,最终输出可达性优良的站位布局与测量区域。具体规划流程如图19所示。

2) 摄影测量站位仿真

通过合理布设普通与编码标志点,基于K-means聚类算法实现摄站布局优化。

首先,以三角面片中心点为特征点,根据其空间分布进行聚类,生成若干聚类中心;以各聚类中心为起点,沿法向矢量方向偏置一定距离确定初始摄站位置。为提升成像的稳定性,每个摄站拍摄2张方向垂直的相片。随后进行干涉检查,通过构建相机光学中心至特征点的圆柱体光线模型,借助开放级联技术(Open CASCADE Technology, OCCT)布尔运算判断是否存在遮挡,确保测量光线可达。最终输出无遮挡、覆盖均匀的摄站布局,为高精度摄影测量提供可靠的站位配置。

3) 激光扫描仪测量站位仿真

旨在确定激光跟踪仪的位置、主轴方向及反射镜配置,以满足测量约束,并最小化站位数量

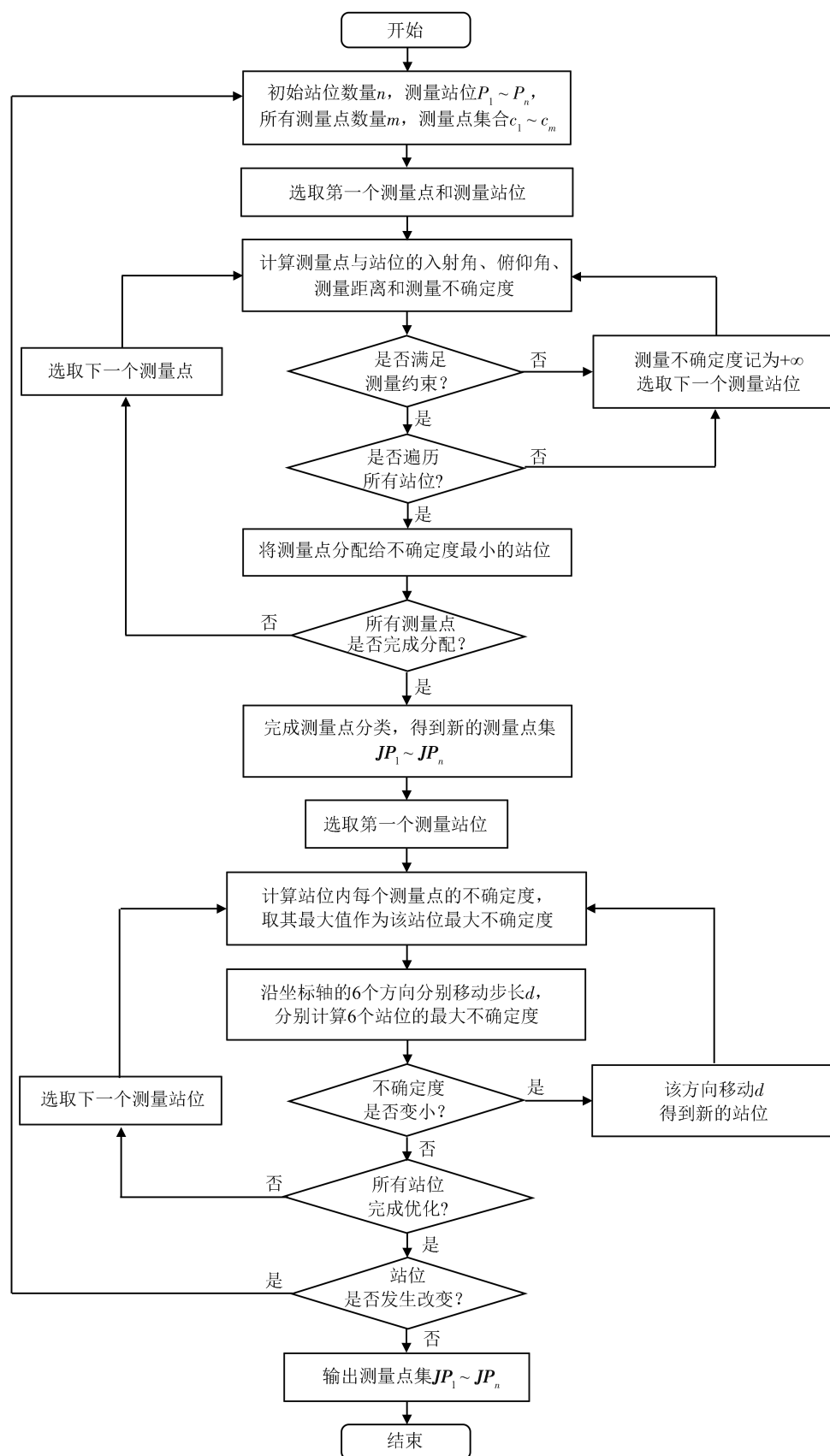


图 19 激光雷达、激光跟踪仪站位仿真规划流程

Fig.19 LiDAR and laser tracker station simulation planning process

与反射镜切换频率。

首先,基于入射角、俯仰角、距离及干涉等约束建立数学模型,确保激光可有效入射T-Scan反射镜。通过离散化设备可放置空间,生成候选站位集合,并结合扫描路径上的位姿序列,逐点

评估站位对连续位姿的覆盖能力。采用反射镜优化策略,在无法入射时选择法向矢量最接近的反射镜,延长同一站位的有效测量范围。最终通过多组规划结果对比,选出站位数最少、反射镜切换最少的最优配置。具体规划流程如图20所示。

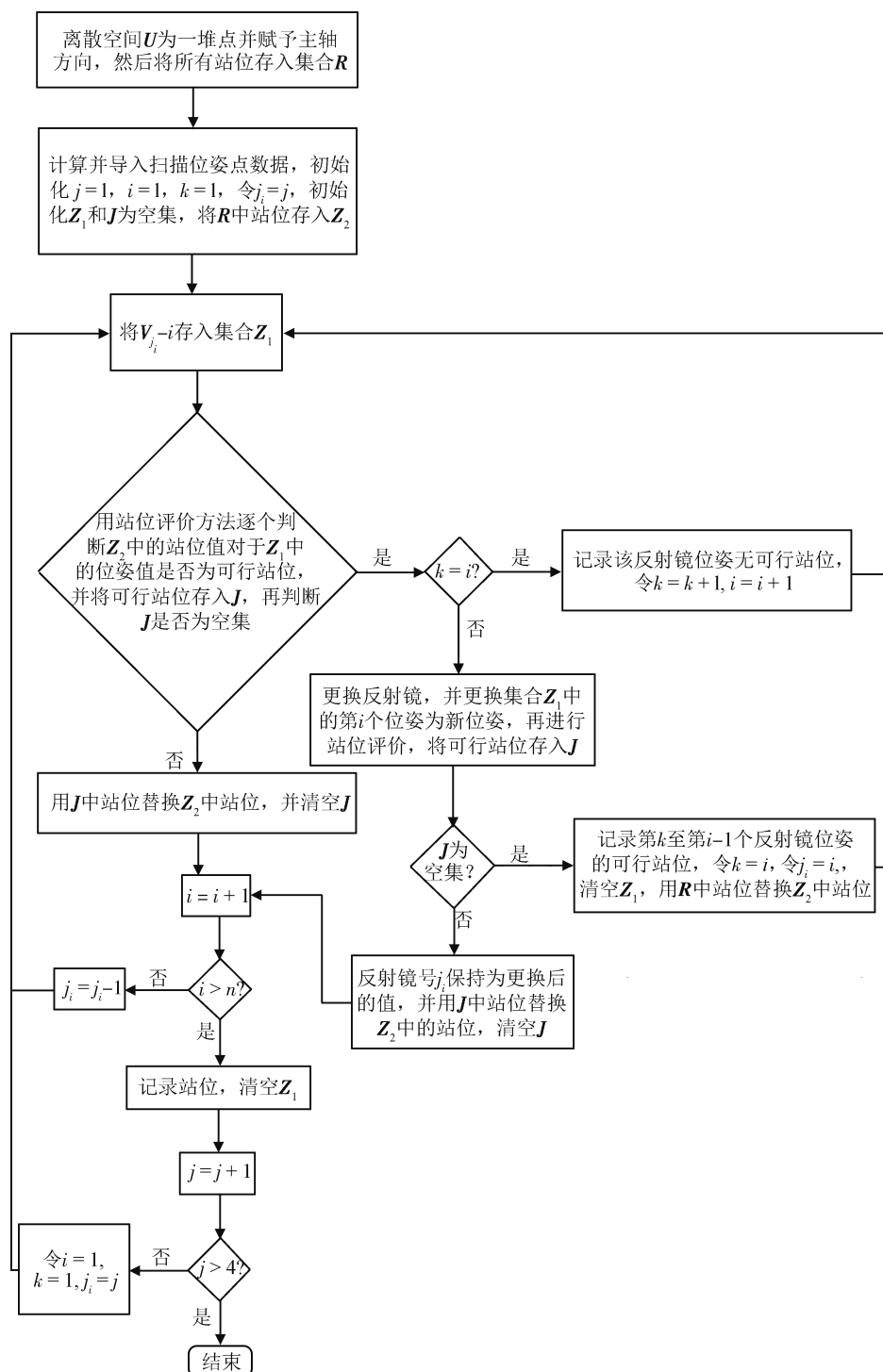


图20 激光扫描仪测量站位仿真规划流程

Fig.20 Laser scanner measurement station simulation and planning process

3.3 协同测量序列规划验证

开展某型飞机表面形貌测量时，需采用激光雷达、激光扫描系统、摄影测量系统、激光跟踪仪、室内GPS协同完成全部的间隙、阶差、外形、交点孔和位姿控制点等全部特征测量，具体如图21所示。以上述测量任务为对象，开展协同测量序列规划相关算法的验证。

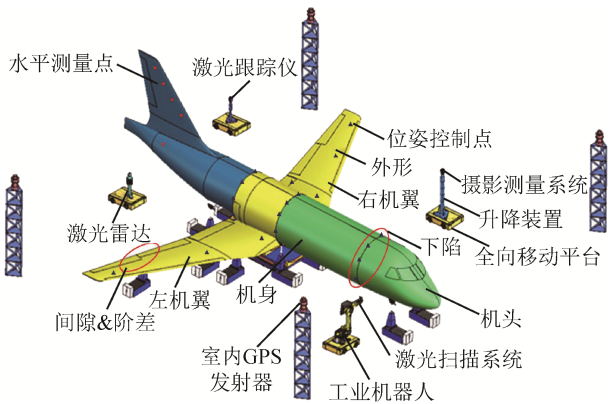


图21 某型飞机表面形貌系统测量示意
Fig.21 Schematic diagram of the systematic measurement of surface topography for a certain aircraft model

首先，确定不同特征的测量任务，表6为上述测量任务的设备适配情况。其次，测量特征分布等给出测量站位与基准，构建单独的测量任务，如表7所示。分别采用LT、LR、LSS、PG和iGPS表示激光跟踪仪、激光雷达、激光扫描设备、摄影测量和室内GPS系统， T 、 MB 和 MS 分别表示测量任务、基准和站位。

通过任务相似性分析与聚类，测量任务被划分为5个层级，如表8所示(h 为迭代层级)。 A_1^h 层

表6 测量特征与设备适配
Tab.6 Measurement characteristics and equipment adaptation

测量特征	测量设备
外形(HMP)	激光雷达、激光扫描系统、摄影测量系统
下陷(GS)	激光雷达、激光扫描系统
交点孔(WP)	激光跟踪仪、摄影测量系统
间隙、阶差(PCP)	激光雷达、激光扫描系统
位姿控制点(Sa)	激光跟踪仪、激光雷达、室内GPS

表7 不同测量任务的相关参数
Tab.7 Parameters corresponding to different measurement tasks

测量任务	测量特征	测量设备	测量站位	测量基准	测量时间/min
T_1	HMP_2	LT_2	MS_2	MB_1	20
T_2	GS_2	LSS_1	MS_6	MB_3	30
T_3	WP_2	LR_1	MS_2	MB_5	180
T_4	WP_3	PG_2	MS_4	MB_2	50
T_5	PCP_1	LT_2	MS_2	MB_1	10
T_6	Sa_3	LSS_2	MS_5	MB_2	20
T_7	PCP_3	iGPS	MS_6	MB_4	10
T_8	GS_5	LSS_1	MS_1	MB_6	15
T_9	WP_1	LR_2	MS_3	MB_2	120
T_{10}	GS_4	LSS_1	MS_1	MB_6	20
T_{11}	WP_1	LR_1	MS_1	MB_1	200
T_{12}	WP_4	PG_2	MS_4	MB_1	40
T_{13}	Sa_1	LSS_1	MS_5	MB_6	30
T_{14}	PCP_2	LT_1	MS_3	MB_1	10
T_{15}	HMP_1	iGPS	MS_6	MB_4	15
T_{16}	Sa_4	LSS_1	MS_5	MB_6	20
T_{17}	GS_1	LSS_2	MS_3	MB_2	20
T_{18}	HMP_3	LT_1	MS_4	MB_1	25
T_{19}	GS_3	LSS_2	MS_5	MB_4	10
T_{20}	Sa_2	LSS_1	MS_2	MB_6	20

表8 基于测量任务相似性的聚类结果
Tab.8 Clustering results based on measurement task similarity

h	A_1^h	A_3^h
1	$T_3、T_6、T_7、T_8、T_{12}$	$T_{10}、T_{15}$
2	$T_1、T_2、T_4、T_{19}$	T_5
3	$T_9、T_{11}、T_{13}$	T_{16}
4	$T_{14}、T_{20}$	
5	$T_{17}、T_{18}$	

中各任务的测量设备、站位及基准均不同, A_3^1 层各任务在 A_1^1 层中均存在更高优先级的对应任务。对5层任务集进行邻接关联, 生成如图22所示的

测量序列, 其中包含5条任务线, 用于指导任务有序执行。经计算, 最长任务线耗时585 min, 即为该序列的理论总测量时间。

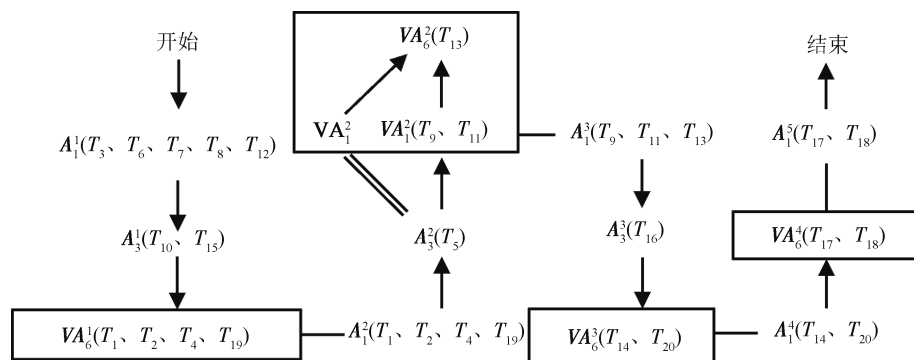


图22 基于任务相似性的协同测量序列预规划结果

Fig.22 Pre-planned collaborative measurement sequence based on task similarity

基于时间成本对聚类后的测量任务集进行序列优化, 得到图23中蓝色标记的优化序列。相较于初步规划结果, 任务线增加一条, 任务分布则更均匀。优化后, 整体测量时间由585 min降至380 min, 各任务线耗时差异减小, 表明测量设备利用率得到提升。该序列可作为实际测量执行依据, 有助于提高协同测量效率。

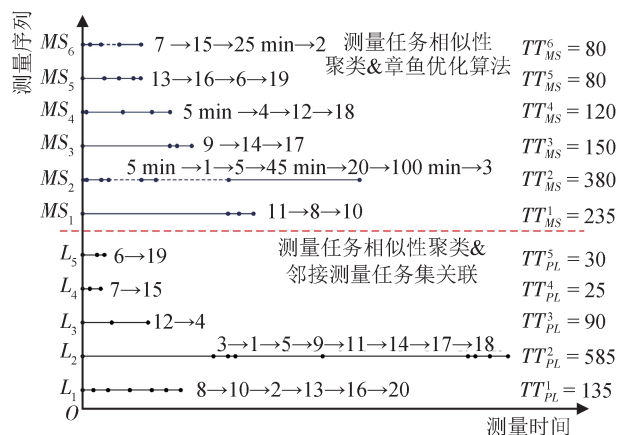


图23 预规划与优化后的测量序列对比

Fig.23 Comparison between the pre-planned and optimized measurement sequences

4 大型复杂结构装配多系统协同精密测量平台开发与验证

飞机大型复杂结构装配多系统协同精密测量平台集硬件管控与数据处理于一体, 既涵盖激光跟踪仪、激光雷达等测量设备及工业机器人、全

向移动平台等辅助装备的集成控制与空间调度, 也包含测量任务规划、仿真校验、测量场优化、多源数据融合及转站定位等关键算法。该平台通过有机集成各类装备、控制信号与数据处理模块, 实现集中管控, 保障协同测量过程的有序与高效。

4.1 装配协同精密测量平台开发

飞机装配协同精密测量平台典型应用场景如图24所示。通过测量设备采集装配特征数据, 辅助装备实现测量设备与装配特征的自动空间转站, 集成软件则负责调度控制所有硬件资源。此外, 该软件还承担测量特征规划、任务构建、分发与仿真等预处理功能。系统中所有控制指令与测量数据均通过统一局域网进行传输与交互。

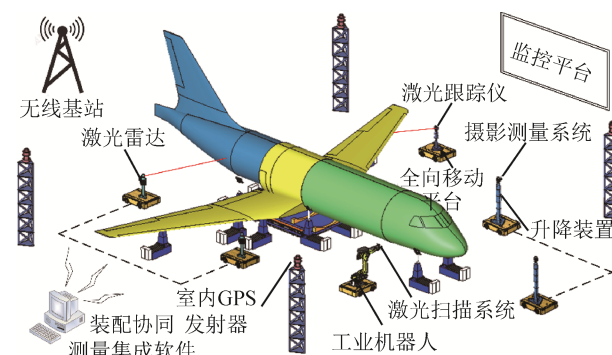


图24 飞机装配协同精密测量平台典型应用场景

Fig.24 Typical application scenarios of the aircraft assembly collaborative precision measurement platform

装配协同测量数据集是平台实现的基础，具体由图 25 所示的 7 个部分组成。各数据集除具有

自然语言表达形式外，均对应相应的二进制编码集。

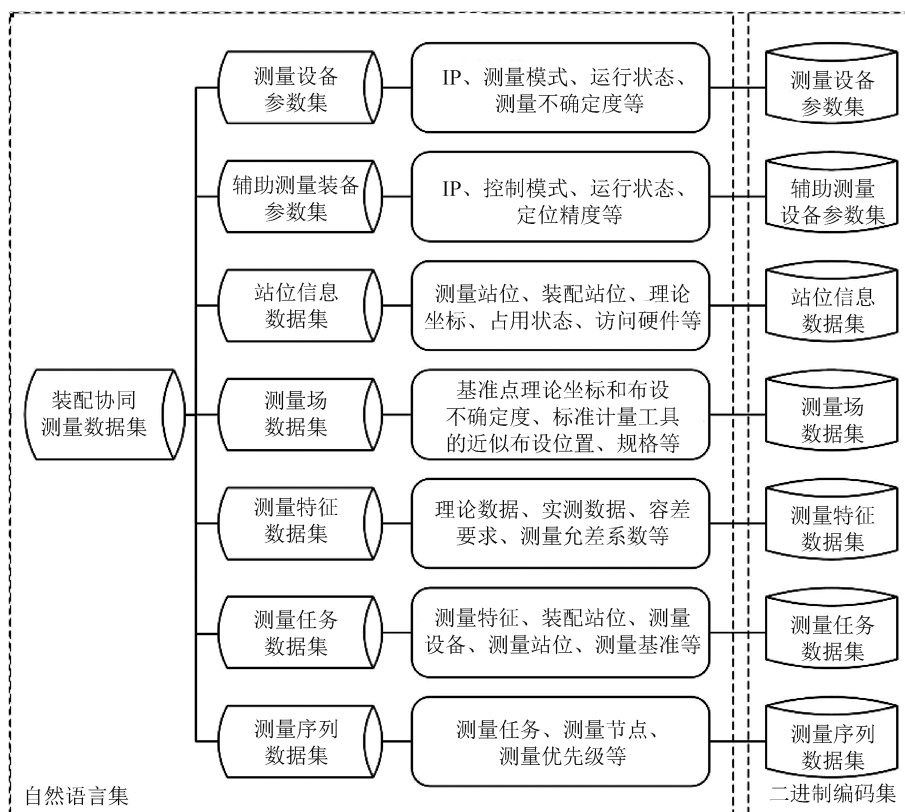


图 25 协同测量平台数据集

Fig.25 Collaborative measurement platform data set

参数集涵盖 IP、测量模式、运行状态及不确定度等信息；站位数据集包含理论坐标、占用状态与访问硬件；测量场数据集包括基准点坐标、布设不确定度及计量工具规格。测量特征数据集含理论值、实测值与容差要求，是测量规划与数据处理的基础。测量任务数据集记录具有唯一指向的工艺与执行状态信息；测量序列数据集则是任务规划的输出，包含任务、节点与优先级等内容。

基于 VS2010、DevExpress、MySQL、CATIA 与 AnyCAD 开发协同测量平台软件，具体包括以下模块：

1) 测量系统配置模块：负责更新设备 IP、运行状态等参数，通过 TCP/IP 协议与测量设备及辅助装备建立通信，配置测量模式与补偿系数。

2) 特征提取及测量场规划模块(见图 26)：将装配特征解构为离散测量点，依据容差匹配测量

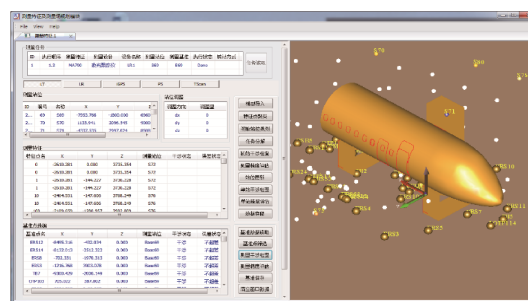


图 26 特征提取及测量场规划模块

Fig.26 Feature extraction and measurement field planning module

设备，以整体不确定度最小为准则规划站位，利用 AnyCAD 进行干涉检查，构建 ERS 点可行空间，并基于第 2.2 节方法规划协同测量场。

3) 测量模型构建、任务创建与仿真模块(如图 27 ~ 图 29 所示)：组织测量特征、站位、设备与基准等信息生成测量任务，采用二进制编码表达，

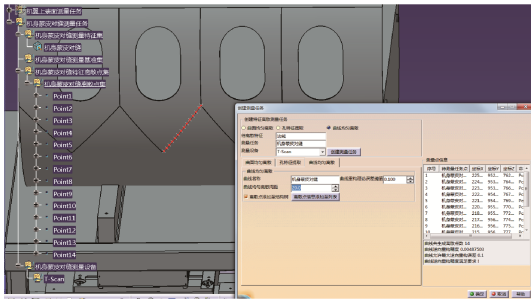


图 27 测量模型构建模块

Fig.27 Measurement model construction module



图 28 测量任务创建模块

Fig.28 Measurement task creation module

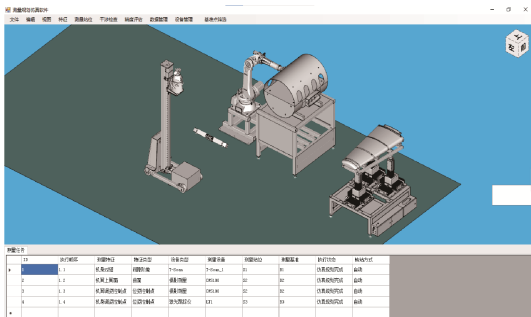


图 29 测量任务仿真模块

Fig.29 Measurement task simulation module

依据第3.1节构建测量模型,采用第3.2.1节和第3.2.2节方法实现任务聚类与序列规划,并基于第3.2.3节方法仿真评估多系统协同部署的合理性。

4) 测量任务控制模块(见图30):实现任务的选取、分发、启动与重置,支持单任务或多任务自动执行,提供手动控制界面,并通过AnyCAD平台实时显示测量过程。

5) 测量任务执行模块:接收控制指令,通过TCP/IP控制测量设备完成初始化与数据采集,实时规划转站路径,控制平台与机器人完成定位与姿态调整。



图 30 测量任务控制模块

Fig.30 Measurement task control module

6) 测量数据处理模块(见图31):基于第2.3节方法实现多源测量坐标系统一优化与数据融合,计算转换与测量不确定度,在三维环境中可视化显示装配偏差。

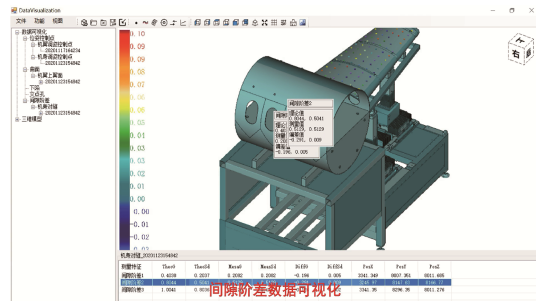


图 31 测量数据处理模块

Fig.31 Measurement data processing module

7) 测量数据管理模块:负责维护多架次装配协同测量相关数据集,包括测量特征、测量场、站位信息及测量任务等数据。

飞机复杂结构装配多系统协同精密测量的总体实施流程如图32所示。首先进行测量工艺规划,将装配特征解构为可测点特征,确定测量方式与设备、规划站位与测量场,并构建测量基准。随后建立测量任务,编码后规划测量序列,通过仿真校验其合理性。任务分发后执行基准与特征测量,完成数据采集。最后处理测量数据,在三维环境中显示装配偏差,并存储或传递至调姿系统。

4.2 飞机翼身对接协同测量试验

为验证提出的相关算法有效性以及协同测量在精度提升等方面的显著优势,以图33所示的飞机机身和机翼模拟件的对接过程为研究对象,开

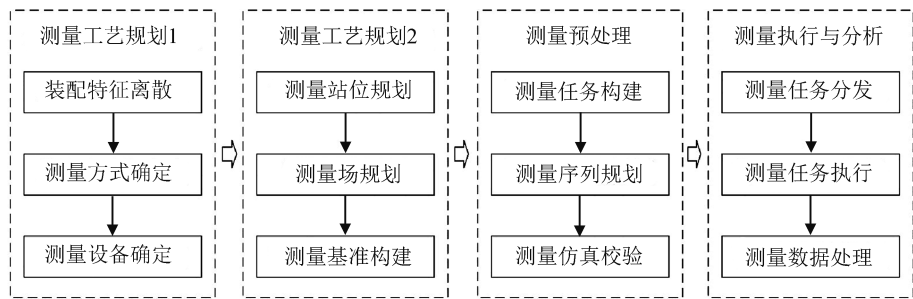


图 32 多系统协同精密测量实施流程

Fig.32 Multi-system collaborative precision measurement implementation process

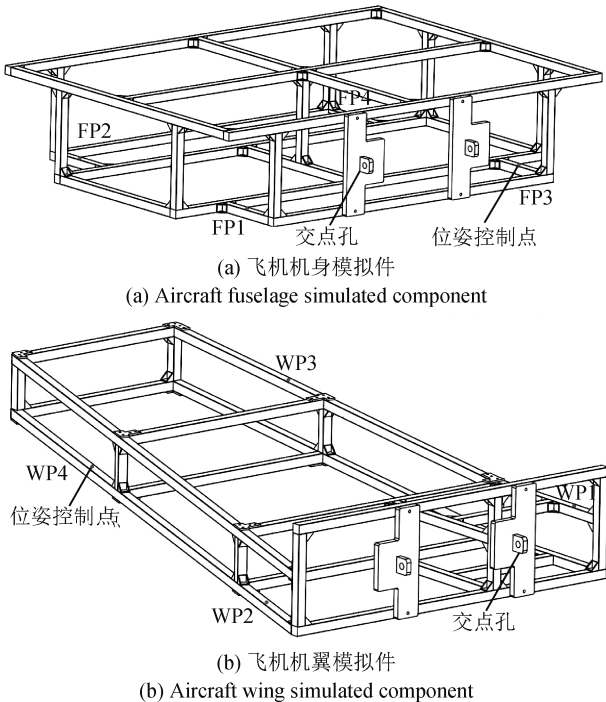


图 33 飞机机身和机翼模拟件

Fig.33 Aircraft fuselage and wing simulated component

展协同精密测量模拟试验。翼身模拟件设计参考了大型飞机中央翼盒-机翼的对接设计过程，机翼尺寸为 2 500 mm × 1 200 mm × 400 mm，机身尺寸为 1 500 mm × 1 000 mm × 500 mm，采用叉耳连接方式，装配关键特征为叉耳交点孔(公称直径 Φ 20 mm)与位姿控制点(理论坐标如表 9 所示)。

图 34 为翼身对接协同测量试验平台，主要包括翼身模拟件、数控定位器、全向移动平台、多种激光跟踪仪(型号包括 AT401、AT901-MR)、室内 GPS、激光位移传感器、工业机器人及激光扫描系统等。激光跟踪仪测量机翼与机身的位姿控制点；室内 GPS 与激光位移传感器负责全向移动平

表 9 模拟件位姿控制点理论坐标

Tab.9 Theoretical coordinates of the pose control points for the simulated component

单位: mm

位姿控制点名称	x	y	z
FP1	490.365	-78.251	-446.688
FP2	490.629	-77.292	447.919
FP3	-678.808	-77.787	-448.089
FP4	-679.323	-77.336	448.216
WP1	490.805	92.113	-954.168
WP2	-590.703	-77.288	-958.156
WP3	664.409	92.008	-2 206.884
WP4	-112.935	-77.852	-2 216.731

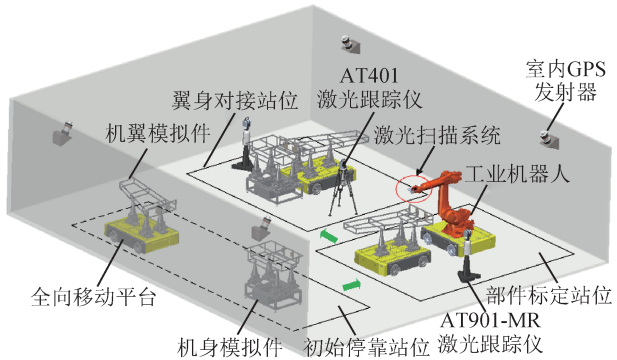


图 34 翼身对接协同测量试验平台

Fig.34 Wing-to-fuselage alignment collaborative measurement test platform

台的导航定位；机器人、扫描系统与 AT901-MR 跟踪仪构成自动扫描系统，用于测量交点孔。机翼通过工艺接头与定位器和移动平台相连，可在空间内灵活转站与调姿装配；机身由定位器与支

撑平台固定,下方设有顶升模块,便于移动平台搭载转场测量。

试验主要包括两个部分:① 标定机翼与机身的装配特征,并根据获取到的交点孔的理论位姿与参数,评估其配合精度;② 执行翼身对接调姿测量,涵盖定位器标定、机身调平与机翼调姿。

试验中共构建6个测量任务,执行流程如下:
① 机身标定测量:将机身运送至自动扫描系统测量站位,测量其位姿控制点和交点孔,结合理论数据解算实际孔径与理论位姿;② 机身由全向移动平台运送至对接站位,随后驱动机翼一体化平台进入测量站位;③ 机翼标定测量:测量机翼位姿控制点与交点孔,解算其实际孔径与理论位姿;④ 将机翼运送至对接站位,根据实测数据计算交点孔配合精度;⑤ 机身定位器标定测量:机身到位后,使用激光跟踪仪测量ERS点,联合工具坐标系,驱动定位器并测量基准点,标定其在装配坐标系中的运动方向;⑥ 机翼定位器标定测量:过程同步骤⑤,在机翼测量转站完成后执行;⑦ 机身调平测量:测量机身位姿控制点,计算与理论位姿的偏差,求解并驱动定位器运动,迭代至定位器运动量极小;⑧ 机翼调姿测量:过程同步骤⑦,紧随步骤⑥执行;⑨ 使用系列销式塞规测量交点孔配合偏差,偏差值为孔标称直径与可插入最大塞规直径之差。

图35为翼身叉耳交点孔扫描点云数据,通过拟合算法即可得到表10所示的实测参数。根据文献[24]中的交点孔相对位姿计算公式,求解得出2个交点孔的配合误差分别为0.371 mm和0.338 mm。

为验证本文提出的协同测量场优化与多源数

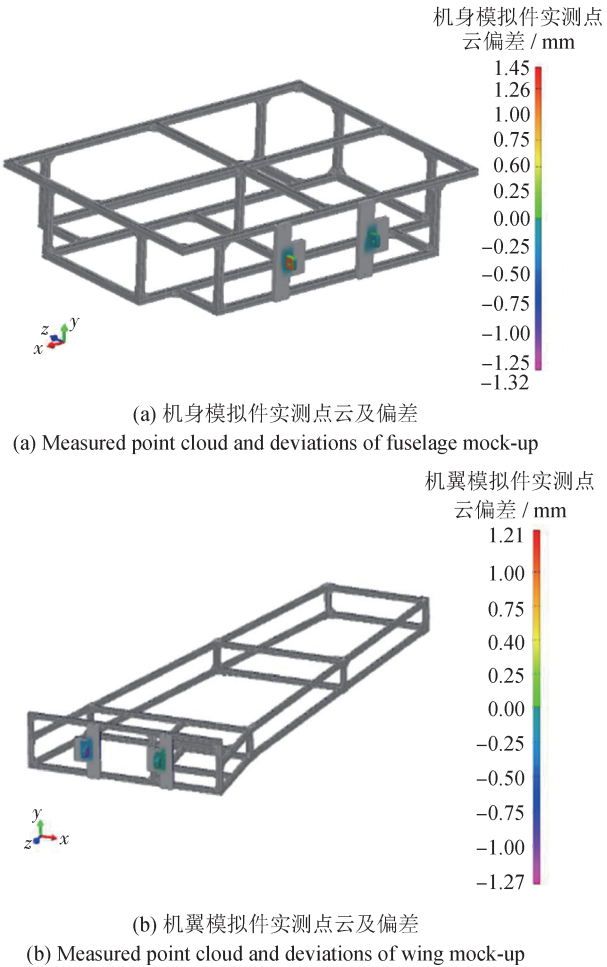


图35 叉耳交点孔实测点云数据
Fig.35 Measured point cloud data of the fork-lug junction holes

据融合算法的测量精度优势,待机身、机翼转运至对接站位后,设置5组差异化测量配置开展试验,完成ERS基准点与位姿控制点的数据采集与解算。案例Ⅰ中,仅采用AT401激光跟踪仪实施单机站测量,依靠ERS点完成局部坐标统一;案例Ⅱ中,采用量程与精度规格更高的AT901-MR

表10 叉耳交点孔实测结果

Tab.10 Measured results of the fork-lug fitting holes 单位: mm

交点孔	圆心坐标			端面圆直径 d	法向		
	x	y	z		x	y	z
机身孔1	-138.973	19.961	-644.853	0.996	0.996	0.995	0.995
机身孔2	-312.040	20.010	-644.917	0.995	0.995	0.995	0.995
机翼孔1	-140.134	19.958	-645.016	0.996	0.996	0.996	0.996
机翼孔2	-313.172	19.984	-645.251	0.995	0.995	0.995	0.995

激光跟踪仪进行测量, 同样依托 ERS 点实现坐标配准。案例Ⅲ、案例Ⅳ在案例Ⅰ、案例Ⅱ单一跟踪仪测量基础上, 引入标准计量器具协同构建多仪器测量场; 案例Ⅴ则在案例Ⅲ、Ⅳ硬件配置条件基础上, 融合 2 台激光跟踪仪的多站观测数据, 实现跨测量站多源点云与基准信息联合解算。

由图 36 可知: 同一个位姿控制点的不确定度最大值均出现在案例Ⅰ或案例Ⅱ中(单独采用激光跟踪仪测量), 案例Ⅲ、案例Ⅳ不确定度居中, 最小值均出现在案例Ⅴ中。这表明: 引入第 2.3 节的标准计量器具, 可有效优化测量坐标向全局坐标转换时的不确定度, 而多源数据的加权优化可明显提高测量精度。

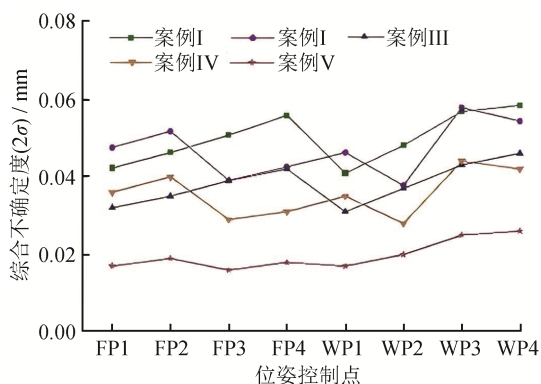


图 36 不同案例下的控制点测量不确定度结果

Fig.36 Uncertainty results of control points under different cases

在案例Ⅰ、案例Ⅲ和案例Ⅴ中执行翼身对接调姿, 考虑到本系统使用激光跟踪仪标定, 同时定位器的重复定位误差为 0.015 mm, 为使交点孔偏差最小, 设定定位器驱动量小于 0.02 mm 为终止条件。交点孔装配后偏差统计见图 37 和图 38。整体上, 实际配合精度优于预分析值, 且受位姿控制点测算方式影响。孔 1 与孔 2 的平均配合偏差在案例Ⅲ中为 0.414 mm 与 0.381 mm, 较案例Ⅰ(0.434 mm、0.398 mm)中更低, 案例Ⅴ中孔 1 与孔 2 的平均配合偏差进一步下降 3.57% 与 3.99%。分析结果表明: 采用优化协同测量场及高精度测量设备加权融合策略, 可有效降低配合偏差, 提升对接质量。

在传统手动控制模式下, 完成部件转站、标定检测、翼身对接需 1.5~2 h。本文所述装配协同

测量试验方法通过多任务并行执行机制, 实现了机翼标定与机身定位器标定、机翼标定与机身调平等工序的同步自动化作业, 将整体装配时间缩短至约 40 min, 显著提升了装配效率。

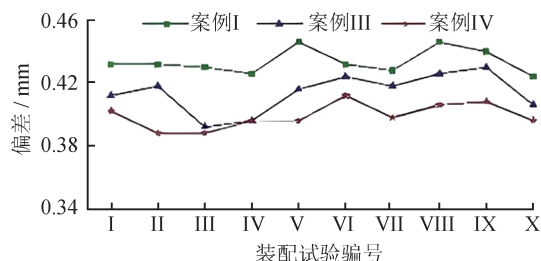


图 37 交点孔 1 装配后偏差统计

Fig.37 Post-assembly deviation statistics of fitting hole 1

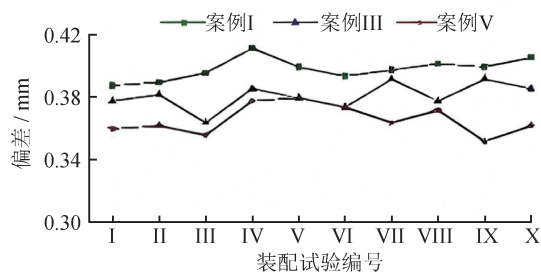


图 38 交点孔 2 装配后偏差统计

Fig.38 Post-assembly deviation statistics of fitting hole 2

5 结论

针对飞机大型复杂结构装配中存在的测量精度低、效率和协同性差、缺乏统一测量平台等瓶颈问题, 本文系统性地开展了多系统协同精密测量技术与平台研究, 主要成果与结论如下:

1) 梳理了多系统协同精密测量需求, 提出了以测量场高精度构建为基础、模型引导的测量规划为核心、协同精密测量平台为手段的技术实现路径。

2) 突破了多系统协同大尺度测量场高精度构建技术: 构建了大尺度球坐标测量不确定度解析模型, 实现了球坐标测量系统不确定度的高效精准评估; 在装配特征精度要求约束下, 推导了基于公共基准点的协同测量场自适应规划算法; 研制了用于异构设备间多目标多特征基准转换的标准器, 经验证算法与计量标准器具综合应用可大幅提高测量场精度。

3) 提出了复杂部组件装配三维轻量化测量模型构建方法: 研究了面向装配测量的三维模型拓扑信息提取、测量特征自动化识别以及测量点位置获取算法与流程; 梳理了包含测量信息提取、测量信息标注、测量点规划以及关联信息标注的三维轻量化测量模型构建流程, 实现了基准、设备、容差、精度等测量辅助信息在轻量化三维模型的集成管控, 为后续面向复杂装配特征的测量规划实现提供基础。

4) 提出了测量任务驱动的多系统协同精密测量规划方法: 通过测量任务相似性量化表达、聚类以及时间成本约束的测量任务序列优化, 突破了面向复杂测量需求的任务规划技术; 研究了面向不同设备的数字化协同测量仿真与优化技术, 给出了激光跟踪仪、摄影测量、激光扫描仪等系统的仿真规划流程。

5) 开发了集硬件管控与数据处理于一体的飞机大型复杂结构装配多系统协同精密测量平台, 实现了复杂测量场景下的测量任务规划、仿真校验、测量场优化、多源数据融合及转站定位, 完成了测量设备与辅助装备的集成管控与空间调度、测量数据精准管控与分析, 保障了协同测量过程的有序与高效。

参考文献

- [1] 杨亚鹏, 赵安安, 杜坤鹏, 等. 飞机复材主承力结构数字化高性能装配协调技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2024, 67(16): 14-31.
Yang Yapeng, Zhao An'an, Du Kunpeng, et al. Research and application of digital high performance assembly coordination technology for aircraft composite main bearing structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(16): 14-31.
- [2] 郝龙, 刘涵予, 黄翔, 等. 基于实测数据的飞机虚拟预装配技术发展综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 65-77.
Hao Long, Liu Hanyu, Huang Xiang, et al. Review of virtual pre-assembly technology for aircraft based on measured data [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 65-77.
- [3] 隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(11): 1449-1460.
Sui Shaochun, Zhu Xusheng. Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality [J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(11): 1449-1460.
- [4] 朱永国, 黄翔, 李洸杲, 等. 飞机装配高精度测量控制网精度分析与构建准则[J]. 中国机械工程, 2014(20): 2699-2704.
Zhu Yongguo, Huang Xiang, Li Shuanggao, et al. Precision analysis and layout rules of surveying control network for aircraft assembly [J]. China Mechanical Engineering, 2014(20): 2699-2704.
- [5] 张开富, 史越, 骆彬, 等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 0312004.
Zhang Kaifu, Shi Yue, Luo Bin, et al. Research progress of high precision measurement technology in large aircraft assembly [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312004.
- [6] Mei Zhongyi, Maropoulos P G. Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(10): 1185-1197.
- [7] Drouot A, Zhao Ran, Irving L, et al. Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(11): 393-398.
- [8] Zeng Qi, Li Shuanggao, Huang Xiang. Correction to: configuration optimization of the feature-oriented reference system in large component assembly [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(3/4): 689-690.
- [9] Deng Zhengping, Li Shuanggao, Huang Xiang. Uncertainties evaluation of coordinate transformation parameters in the large-scale measurement for aircraft assembly [J]. Sensor Review, 2018, 38(4): 542-550.
- [10] 任瑜. 异构网络坐标测量精度分析与算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
Ren Yu. Research on accuracy analysis and algorithm of heterogeneous-network coordinate measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [11] Zhang Fumin, Qu Xinghua. Fusion estimation of point sets from multiple stations of spherical coordinate instruments utilizing uncertainty estimation based on Monte Carlo [J]. Measurement Science Review, 2012, 12(2): 40-45.
- [12] Yin Shibin, Ren Yongjie, Guo Yin, et al. Development and calibration of an integrated 3D scanning system for high-accuracy large-scale metrology [J]. Measurement, 2014, 54: 65-76.
- [13] Li Qi, Huang Xiang, Li Shuanggao. A laser scanning posture optimization method to reduce the measurement uncer-

- tainty of large complex surface parts [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(10): 105203.
- [14] 马慧宇, 林嘉睿, 张饶, 等. 大尺寸分布式测量网络重构关键技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1112001.
Ma Huiyu, Lin Jiarui, Zhang Rao, et al. Research on key technologies for large-scale distributed measurement network reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1112001.
- [15] 郭洪杰, 赵建国, 李云飞, 等. 基于WMPS的飞机大部件对接测控技术[J]. 测控技术, 2016, 35(1): 149-152.
Guo Hongjie, Zhao Jianguo, Li Yunfei, et al. Measurement and control technology of aircraft components alignment based on WMPS [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(1): 149-152.
- [16] 戴肇鹏. 飞机部件对接调姿技术研究与软件开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
Dai Zhaopeng. Research on the adjustment technology of position and pose for aircraft component assembly and software development [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [17] 杜福洲, 于浩, 李强. 基于多源测量数据融合的间隙与阶差自动化测量技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 14-20.
Du Fuzhou, Yu Hao, Li Qiang. Research on gap and step difference automatic measurement technology based on multi-source measurement data fusion [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 14-20.
- [18] 林雪竹, 曹国华, 李丽娟, 等. 多传感融合的飞机数字化测量技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(7): 46-49.
Lin Xuezhu, Cao Guohua, Li Lijuan, et al. Aircraft digital measuring technology of multi-sensor fusion [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(7): 46-49.
- [19] Zhang Yifan, Wang Qing, Zhao An'an, et al. A multi-object posture coordination method with tolerance constraints for aircraft components assembly [J]. Assembly Automation, 2020, 40(2): 345-359.
- [20] Zhou Zhilong, Liu Wei, Wang Yuxin, et al. An accurate calibration method of a combined measurement system for large-sized components [J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(9): 095013.
- [21] 胡帅, 魏开利, 赵子越. 用于飞机数字化制造装配的多系统协同几何量测量平台构建方案探讨[J]. 中国计量, 2021(4): 100-102.
Hu Shuai, Wei Kaili, Zhao Ziyue. Discussion on the construction scheme of multi-system collaborative geometric measurement platform for aircraft digital manufacturing and assembly [J]. China Metrology, 2021(4): 100-102.
- [22] 陈杰, 杨亚鹏, 杜坤鹏, 等. 基于测量组网的大尺寸高精度测量场研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 70-73.
Chen Jie, Yang Yapeng, Du Kunpeng, et al. Research on large-scale and high-precision measurement field based on measurement network [J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(5): 70-73.
- [23] 郑联语, 朱绪胜, 姜丽萍. 大尺寸测量技术在航空制造业中的应用及关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(7): 36-41.
Zheng Lianyu, Zhu Xusheng, Jiang Liping. Application of large-scale measurement in aviation manufacturing and its key technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(7): 36-41.
- [24] 邓正平. 面向对合状态优化的飞机大部件对接技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Deng Zhengping. Research on techniques of aircraft large component alignment for coordination states optimization [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [25] Li Shuanggao, Zeng Qi, Chen Fang, et al. A cost-effective planning method for automatic measurement based on task similarity and octopus optimization [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(9): 095001.
- [26] 罗泉, 杨亚鹏, 赵安安, 等. 飞机制造过程三维测量模型构建与数据管理技术研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(12): 121-133.
Luo Xiao, Yang Yapeng, Zhao An'an, et al. Research on 3D measurement model construction and data management technology of aircraft manufacturing process [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(12): 121-133.
- [27] 杜福洲, 郭瑞振. 基于模型定义的测量规划与质量评定应用框架研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 44-50.
Du Fuzhou, Guo Ruizhen. Research on application framework of measurement planning based on model definition and quality evaluation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 44-50.
- [28] 劳嫦娟, 赵子越, 孙双花, 等. 面向飞机装配的三维测量工艺模型构建技术[J]. 中国测试, 2020, 46(S2): 98-101.
Lao Changjuan, Zhao Ziyue, Sun Shuanghua, et al. Construction technology of 3D measurement process model for aircraft assembly [J]. China Measurement & Test, 2020,

- 46(S2): 98-101.
- [29] 郭迎钢, 石风森, 徐嘉泽. 多传感器融合的工业测量技术现状及展望[J]. 测绘通报, 2025(增刊1): 44-49.
Guo Yinggang, Shi Fengmiao, Xu Jiaze. Status and prospect of industrial measurement technology of multi-sensor fusion [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025 (S1): 44-49.
- [30] 王少锋, 洪军, 贺巧玲, 等. 大尺寸组合式测量方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2638-2642.
Wang Shaofeng, Hong Jun, He Qiaoling, et al. Large-size combined measurement method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2638-2642.
- [31] 王洪喜, 孙正阳, 刘冰, 等. 基于拉绳位移传感器的飞机大部件对接测量场构建与位姿求解[J]. 光学精密工程, 2024, 32(21): 3184-3199.
Wang Hongxi, Sun Zhengyang, Liu Bing, et al. Construction of measurement field and pose solution for aircraft large component docking based on cable displacement sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32 (21): 3184-3199.
- [32] 吴晓峰, 张国雄. 室内GPS测量系统及其在飞机装配中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(5): 1-5.
Wu Xiaofeng, Zhang Guoxiong. Indoor GPS measurement system and its application in aircraft assembly [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(5): 1-5.
- [33] 丁力平, 陈文亮, 卢鹤. 面向大型飞机装配的组合式大尺寸测量系统[J]. 航空制造技术, 2013, 43(13): 76-80.
Ding Liping, Chen Wenliang, Lu Hu. Combined large-scale measurement system for large aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 43 (13): 76-80.
- [34] 孙安斌, 高廷, 乔磊, 等. 大尺寸测量设备高空精测平台的研制[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 39-42.
Sun Anbin, Gao Ting, Qiao Lei, et al. Development of high altitude precision measuring platform for large-scale measurement equipment [J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(5): 39-42.
- [35] Deng Zhengping, Li Shuanggao, Huang Xiang. Coordinate transformation uncertainty analysis and reduction using hybrid reference system for aircraft assembly [J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 487-496.
- [36] 曾琪. 面向飞机装配的多源系统协同测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
Zeng Qi. Research on multi-system cooperative measurement technology for aircraft assembly [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [37] 乔磊, 孙安斌, 王继虎, 等. 基准转换标准器在多系统集成中的应用[J]. 计测技术, 2021, 41(1): 17-21.
Qiao Lei, Sun Anbin, Wang Jihu, et al. Application of datum conversion standard board in multi-system integration measurement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(1): 17-21.
- [38] 毛喆. 飞机装配几何特征三维测量模型构建技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Mao Zhe. Building technology of 3D measurement model for geometric features in aircraft assembly [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [39] 李琦. 飞机大型结构件自动化测量技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
Li Qi. Research on automatic measurement technology of large structural parts of aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [40] Kam C L. A geometric decomposition method for part programming of CMMS [J]. Autofact Europe Conf., 1993: 1315-1324.

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一作者: 侯国义(1992—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 江苏省卓越博士后, 担任中国图学会青年工作委员会委员等职务。主要研究方向为数字化测量辅助飞行器高性能装配技术及装备、航空制造计量与测量数字化、大语言模型驱动的工业知识图谱等基础研究与工程应用。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划等课题10余项, 编制团体标准1项。获得2024年度国防科技进步奖一等奖1项(R3)、2024年度四川省科学技术进步奖三等奖1项(R3)、2024年度机械工业科学技术进步奖三等奖1项(R3)、2024年度陕西省优秀博士论文等。



通信作者: 黄翔(1963—), 男, 教授, 博士研究生导师, 全国航空专用计量测试技术委员会委员。主要研究方向为飞机装配、数字化测量和智能制造。近年来主持国家自然科学基金、国家重点实验室创新基金等科研项目20余项。获得2025年度国家技术发明奖二等奖1项, 省部级科技奖励8项, 授权专利50余项, 发表论文100余篇、专著2部。