

## 2022 年大飞机先进总装技术创新联合体项目详细介绍

### 一、多机协同装配

#### 1. 小型轻量化机器人紧固件安装末端执行器研制

##### 项目背景：

高锁螺栓因其高强度、抗疲劳、优异的自锁防松性能和便于装配等优点，广泛应用于现代飞机结构设计中。据统计，一架民用飞机需要安装数十万颗不同种类规格的高锁螺栓。随着复合材料在新机型中用量比重的增加，铆接结构应用比重有降低趋势，而高锁螺栓连接结构应用却在增加。

目前，民机自动化制孔技术已经获得了重大突破，并且实现自动化应用，有效提高了加工效率和加工质量。然而，对于高锁螺栓的安装，由于其安装步骤繁复（包括涂胶、螺钉安装、垫圈安装（特殊工况下）和螺母拧紧等一系列安装步骤），且安装工况复杂。目前，高锁螺栓的安装主要是人工操作，借助简单扳手完全人力作业，或者是借助气动或电动安装工具进行作业，存在效率低、劳动强度大、安装技术要求高、质量难以保证等问题。此外，散落的螺帽遗留在飞机内部容易造成安全隐患。随着生产任务的增加，探索高锁螺栓螺母高效高质安装方法势在必行。实现高锁螺栓螺母的自动化装配，需要突破一系列零件自动定位、

自动对正、拧紧控制、密封胶涂敷等诸多技术难点。

### 项目目标及技术指标：

#### 项目目标：

本研究基于机器人控制和交互、机器视觉定位、人工智能技术，开展高锁螺母机器人自动化安装末端执行器研制。所研制小型化、轻量化末端执行器集成机器视觉系统、螺母螺接装置、密封胶涂敷装置、力感应单元、上下料机构等，使用网络通信协议编程实现 UR10 小型协作机器人对末端执行器的实时控制；实现高锁螺母涂胶、安装定位、螺接运动协调、装配力控制、拧紧电机控制、机器人位姿调节等功能。适用于装配现场环境的高锁螺母自动安装。所研制的系统能够连续实现高锁螺母自动上料加载、密封胶涂敷和高锁螺母的自动化安装，装配工艺指标满足技术要求。

#### 技术指标：

本项目希望达成以下技术指标：

(1) 末端执行器主体重量不大于 6KG（不包含密封胶罐体和外部物料加载装置重量）；

(2) 末端执行器主体外形尺寸不大于  $\Phi 120\text{mm} \times 180\text{mm}$ （不包含密封胶罐体、外部物料加载装置、视觉传感器、镜头）；

(3) 螺栓螺母之间定位误差不大于 0.5mm；

(4) 螺栓螺母之间角度定位误差小于  $\pm 1^\circ$ ；

(5) 能够安装包含 CFNT1003CY5、CFNT1003CY6 等规格抗剪型铝合金高锁螺母；

- (6) 末端执行器拧紧扭矩不小于 8Nm;
- (7) 密封胶微量涂敷满足相关工艺要求;
- (8) 高锁螺母安装效率优于 20s/个;
- (9) 技术成熟度由 TRL4 级提高到 TRL6 级。

### 主要研究内容:

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 机器视觉定位引导技术

规划采用 **Eye-in-hand** 相机安装方式, 提出完善简洁的相机标定和手眼标定方法。生成高质量现场图像, 对高锁螺栓等关键特征进行识别, 自动提取螺栓轴向和位置信息。实时规划机器人移动轨迹和位姿, 对机械臂移动路径进行优化和光顺优化处理。

##### 2) 自动送料装置研制

研制高锁螺母自动送料和回收装置, 实现高锁螺母在末端执行器中的连续自动上料输送与安装, 以及实现高锁螺母六角部分拧断分离后的可靠回收。

##### 3) 密封胶微量涂敷技术

采用自动方式在高锁螺母拧紧安装之前对高锁螺母安装贴合面涂敷密封胶。密封胶涂敷位置如图 1 所示, 高锁螺母安装完成后, 要求在结构和螺母之间有连续的密封剂挤出。密封胶定量自动涂敷的难点在于需要设计专门的密封胶涂敷工具, 涂敷过程中须避免胶体污染紧固件螺纹, 以及避免胶体污染末端执行器等其他区域。

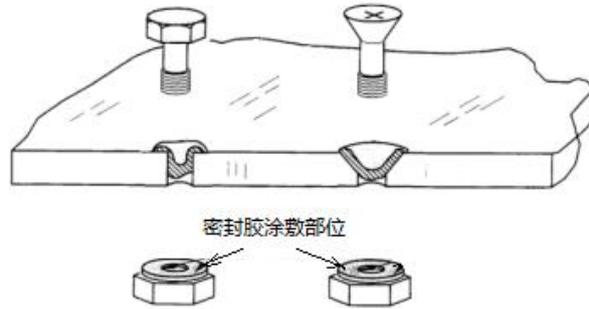


图 1 密封胶涂敷部位

#### 4) 高锁螺母自动安装验证

以客机机身筒段环向对接区域、壁板对接止裂带为对象，应用小型协作机器人开展机器视觉定位引导、机械臂运行轨迹生成、机器人姿态选取、密封胶涂敷、高锁螺母安装等功能验证实验。完成包含 CFNT1003CY5、CFNT1003CY6 等规格抗剪型铝合金高锁螺母安装实验。

##### (2) 研究结果的验证方式

针对典型试验件进行现场功能验证，验证内容：视觉定位精度、螺母安装效率、密封胶涂敷和螺母安装效果。

#### 预期成果：

- (1) 高锁螺母安装末端执行器 1 件（含视觉系统、上下料装置等）；
- (2) 高锁螺母自动安装技术研究报告至少 1 篇；
- (3) 高锁螺母自动安装工艺鉴定规范草案 1 篇；
- (4) 高锁螺母自动安装专利至少 1 篇；
- (5) 高锁螺母自动安装试验报告 1 篇；

(6) 发表论文 1 篇。

## 2. 机身对接区涂胶后双面可靠夹紧技术研究

### 项目背景：

可靠夹紧技术是飞机装配过程中的必要手段，起到零件定位、结构贴合、密封剂挤出等功能，传统装配过程中，为防止钻屑及毛刺进入零件贴合面而影响连接质量，一般采取制孔后分解去毛刺，再涂胶装配的工艺流程，装配效率不高。当前自动制孔已在机身对接区成熟应用，为进一步提升机身对接区装配效率，提出涂胶后叠层结构一次性制孔和镗窝，要求叠层结构被充分压紧，但现有穿心夹的夹紧方式严重制约了自动化制孔率的提升，针对机身对接区装配效率提升的需求，取消现有分解清理涂胶的工序，实现先涂胶，双面充分夹紧，然后实现一次性制孔镗窝，急需寻找新的双面可靠压紧解决方案。

### 项目目标及技术指标：

#### 项目目标：

突破机身对接区涂胶后双面可靠夹紧成套工艺和关键技术，通过仿真和试验对机身对接区双面可靠夹紧工艺方案及工艺参数进行创新优化设计，建立全新的涂胶后一次性制孔工艺体系，并进行典型工况验证，形成大型民机机身对接区域装配可靠夹紧制孔工艺方法，满足低成本、高效率、稳定的制造要求。

#### 技术指标：

(1) 可靠夹紧装置能适配复材、钛、铝叠层结构夹紧；

- (2) 可靠夹紧夹层厚度不小于 4mm;
- (3) 单孔区域夹紧力不小于 400N;
- (4) 技术成熟度从 TRL2 级提升到 TRL5 级。

### 主要研究内容:

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 机身对接区涂胶后双面可靠夹紧工艺方案设计

研究机身对接区夹紧工艺方法，设计机身对接区涂胶后双面可靠夹紧工艺方案，分析不同方案对夹紧力、结构贴合程度、夹层毛刺、密封剂挤出、操作效率的影响，获得双面可靠夹紧方案。

##### 2) 双面可靠夹紧装置研制

针对机身对接区装配典型工况，研制双面可靠夹紧装置，和机身对接区机器人自动制孔末端匹配，开展双面可靠夹紧工况下的机器人自动制孔协同策略研究，实现双面可靠夹紧工况下的自动制孔。

##### 3) 机身对接区双面可靠夹紧工艺仿真分析

开展机身对接区双面可靠夹紧工艺仿真分析，包括求解器的选择、材料本构关系、接触的定义、密封剂挤出、夹紧效果的判定等。通过有限元仿真，揭示夹紧过程中的结构变形、密封剂流动、应力分布规律。

##### 4) 机身对接区双面可靠夹紧工艺参数研究

开展机身对接区涂胶后双面可靠夹紧工艺参数研究，实现夹紧力、夹紧点布置、夹紧装置的选择、夹紧顺序等优化，研究不同工艺参数条件下对夹紧效果及夹紧孔的影响，形成机身对接区

双面可靠夹紧制造工艺体系。

(2) 研究结果的验证方式

针对壁板模拟件进行现场测试验证，验证内容：双面可靠夹紧工艺参数、夹紧效果。

**预期成果：**

- (1) 机身对接区涂胶后双面可靠夹紧工艺指南 1 份；
- (2) 双面可靠夹紧工具/装置 1 套；
- (3) 双面可靠夹紧工具/装置的操作指南 1 份；
- (4) 机身对接区涂胶后双面可靠夹紧有限元模型；
- (5) 技术研究报告 3 份；
- (6) 发明专利 2 项。

### **3. 自动化涂胶在线轨迹实时校准技术研究**

**项目背景：**

使用机器人进行紧固件自动封包时，采用手动定位的方法，将涂胶末端逐个移动至紧固件，效率低下，单个封包时间需 2-3 分钟。拟采用将产品数模导入离线编程软件，仿真涂胶轨迹，生成涂胶程序，然后将程序导入机器人上位机后，自动进行紧固件封包工作，但在实际产品上，安装的紧固件孔位是由手工划线定位，与数模中的理论位置有约±1mm 的偏差，导致安装的紧固件与数模中的位置有偏差，使得自动封包程序运行时，末端不能正确对准紧固件；进行自动填角密封时，已实现在平直的填角工况上实现自动涂胶，填角尺寸满足要求，但当用于飞机舱内填角密

封时，由于飞机舱内的填角密封工况较复杂，有零件变厚度，90°拐角等工况，末端无法自动调节零件距离，导致涂胶不均匀，降低涂胶质量，这就需要开发涂胶轨迹实时校准技术，研究校正算法，控制涂胶末端距离工件表面的距离，校正末端法向位置，与出胶速度和末端运行速度匹配，使涂胶质量和涂胶精度满足要求。另外，由于密封剂带有粘度，目前使用的涂胶胶嘴出胶，覆盖紧固件进行封包的方法，无法避免密封剂拉丝，导致需要手工对每个封包进行整形，影响封包成型效率，拟采用密封帽自动封包的方法，代替现有的涂胶末端封包方法。

#### **项目目标及技术指标：**

项目目标：

研究实时轨迹校正算法以及末端控制技术，解决实际涂胶位置与理论涂胶位置偏差的问题，实现自动化填角密封和紧固件封包的在线轨迹实时校准，同时开发一套紧固件封包帽。

技术指标：

(1) 填角涂胶时水平方向定位精度 $\leq 0.5\text{mm}$ ，垂直方向定位精度优于 $0.5^\circ$ ；

(2) 封包时位置精度 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ ，单个紧固件校准时间 $\leq 1\text{s}$ ；

(3) 轨迹在线校准模块具备密封剂扫描识别、自动定位、寻法向和轨迹实时校正功能；

(4) 技术成熟度由TRL4达到TRL6。

#### **主要研究内容：**

(1) 填角密封在线轨迹校准

开发填角密封在线轨迹校准技术，一是要解决实际涂胶位置与数模理论位置偏差的问题，找正填角初始位置；二是填角工况较复杂，有零件厚度变化、拐角等工况，需要根据实际工况的变化，及时更改出胶端的运行轨迹，使得出胶末端与待涂敷的位置保持一定的距离，实现自动填角密封轨迹校准。

### (2) 紧固件封包实时轨迹校准技术

开发紧固件封包在线轨迹校准技术，找准紧固件的初始位置，解决实际涂胶位置与数模理论位置偏差的问题；找正紧固件法向的位置，控制末端与紧固件轴线一致性，实现封包厚度均匀。

### (3) 紧固件密封帽自动安装技术

开发紧固件密封帽自动安装技术，在密封帽中自动注胶，并与紧固件封包轨迹校准技术结合，实现密封帽自动定位，自动安装。

### 预期成果：

- (1) 自动化涂胶在线轨迹实时校准系统一套（轨迹在线校准模块一套，实时轨迹校准软件 1 套）；
- (2) 密封帽自动注胶安装机构一套；
- (3) 技术研究报告不少于 1 篇（含实验数据原始记录）；
- (4) 软件著作权不少于 1 项；
- (5) 发明专利不少于 1 项；
- (6) 论文不少于 1 篇。

#### 4. 薄壁零件锤铆工艺的减振降噪研究

##### 项目背景：

飞机装配过程中大量紧固件使用锤铆工艺，通过铆枪提供冲击力强迫铆钉、蒙皮发生塑性变形，该过程中大量能量由壁板吸收，产生强烈的振动并伴随大量噪声，损害工人的身心健康，对厂区精密测试仪器精度产生威胁。有必要研究薄壁零件的振动、铆接噪声的产生机理及其传递规律，并通过仿真及试验验证，实现锤铆的减振降噪，降低振动对设备、工装的影响，减少噪声污染、优化现场工作环境。

##### 项目目标及技术指标：

###### 项目目标：

针对薄壁零件锤铆噪声大、振动强烈的问题，开展锤铆噪声测试、振动模态分析，设计相应的减振结构，形成壁板加工孔位的压紧或夹持能力，以边界约束条件降低薄壁结构件的振幅，解决薄壁零件在锤铆工艺条件下共振严重、噪声大的问题，实现锤铆工艺的减振降噪。

###### 技术指标：

- (1) 锤铆工艺下单颗铆钉加工，引起孔周壁板振幅峰值降低50%以上；
- (2) 单钉锤铆连续噪声级降低 3dB(A) 以上；
- (3) 技术成熟度由 TRL2 提升至 TRL4。

##### 主要研究内容：

- (1) 拟解决的关键技术

### 1) 锤铆噪声测试及振动模态分析

以锤铆工作点及周围环境为研究对象，开展噪声源的定位及传播路径研究；选取典型薄壁件及工装，通过施加激励获取其模态参数、响应特性；锤铆工艺下，测试并分离出结构声及空气声，分析其产生机理与传递路径。通过工装降低其辐射能力，减少二次噪声的产生。

### 2) 锤铆减振降噪方案设计及仿真研究

面向锤铆噪声、薄壁结构与工装的连接特性，以机身框、梁为对象，设计减振工装、夹具，结合隔振器、阻尼材料等手段，提出不少于3种减振降噪方案，并进行仿真计算，降低锤铆噪声声压及二次噪声的产生。

### 3) 机身框、梁减振降噪结构应用

设计并制造机身框、梁假件，结合研究内容2的方案与仿真分析结果，通过改变工装与零件的约束方式及阻尼材料的应用，降低壁板的振动频率与幅值；锤铆工具的隔振、吸振夹具设计与验证；通过已有的薄壁件振动响应特性与模态分析结果，设计减振的夹具并验证。

## (2) 研究结果的验证方式

集成一个以机身假件为研究对象的试验平台，综合冲击噪声的声纹特点、振动形态、传递路径，开发多种减振方案并进行仿真及试验验证，形成以边界条件、阻尼材料、隔振器等手段的减振能力。

**预期成果：**

- (1) 机身框、梁为对象的减振降噪试验平台 1 套；
- (2) 铆接装配减振降噪技术研究报告至少 1 篇；
- (3) 锤铆减振降噪方案的仿真报告 1 份；
- (4) 发明专利不少于 1 份；
- (5) 论文不少于 1 篇。

## 5. 面向复杂多面结构件的机器人精准柔顺装配技术研究

### 项目背景：

航空工业对高精度、高性能、高效率批产制造的不断追求，促使广泛应用模块化、柔性灵活的工业机器人成为新一代飞机装配产线的发展趋势。飞机结构中肋板、框等主承力构件具有复杂多连接面的构型，其与蒙皮装配连接时，需精确控制各配合连接面的接触间隙量和接触力值，保证其精准定位。当前将工业机器人应用于飞机隔框定位装配时，主要采用位移控制模式驱动。由于构件实际装配位姿存在不确定性，位移控制模式下机器人无法根据隔框各连接面实际接触状态对定位过程进行及时灵活调整，加之机器人绝对定位精度较低，常常出现隔框/蒙皮连接面间隙超差导致定位接触不充分、或接触力过大导致强迫装配的情况。目前国内尚缺乏面向复杂多面结构件定位协调的机器人高精度柔顺装配技术应用与探索，亟需开展相关技术研究，为新一代大型客机高精度、高性能、高效率批产制造提供关键技术支撑。

### 项目目标及技术指标：

项目目标：

面向新一代大型客机高精度、高性能、高效率批产对装配自动化水平提升的需求，针对复杂多连接面结构件（机加框、肋板、复材一体框等）装配定位协调的接触间隙与接触力控制等难题，突破考虑重力场效应的机器人真实装配力辨识、复杂多面接触定位机器人柔顺控制、面向定位协调的机器人实时高精度控制等关键技术，开展典型多面构件机器人装配定位协调工艺试验，实现复杂多面结构件精准、低应力、快速装配。

技术指标：

(1) 基于工业机器人的机身隔框绝对定位误差 $\leq 0.1\text{mm}$ ；

(2) 2m 以上机身隔框与蒙皮装配定位，各接触面法向最大力值 $\leq 100\text{N}$ ，接触面间隙量 $\leq 0.2\text{mm}$ ；

(3) 技术成熟度提升到 TRL6 级。

主要研究内容：

(1) 拟解决的关键技术

1) 考虑重力场效应的机器人真实装配力辨识

由于重力场效应，机器人末端传感器的示值包含隔框与夹具的重力，且其会随着机器人末端位姿的改变而变化，因此，为准确控制装配力，必须对真实装配力进行辨识。建立隔框/夹具重力分量与机器人末端位姿的映射关系，实现重力场环境下机器人真实装配力的准确计算。

2) 复杂多面接触定位机器人柔顺控制

隔框为多连接面构件，其与蒙皮定位协调过程中，各接触面的受力状态复杂。为保证隔框充分定位且各接触面装配力不超过

阈值，需根据各接触面的受力状态对机器人运动进行相应调整。研究机器人 TCP 与隔框各连接面的受力与运动状态变换关系，构建多面接触刚度自适应动力学模型，实现机器人力位柔顺控制。

### 3) 面向定位协调的机器人实时高精度控制

为精准控制接触力与残余间隙，并保证整个接触定位过程平稳，机器人需精确执行定位调整运动，但传统位移控制难以保证机器人高精度运动。构建基于机器人装配定位的全局最优运动学关系，掌握基于数字化测量的机器人运动实时控制技术，确保隔框高精度定位接触调整。

#### (2) 研究结果的验证方式

依托“机身隔框—蒙皮”机器人自动化装配平台，开展关键技术工艺试验现场验证，通过项目结题评审会验证技术工作的完整性。

#### 预期成果：

- (1) 用于复杂多面构件的机器人精准柔顺装配控制系统 1 套（包括夹持末端、力控传感器及软件控制系统）；
- (2) 面向复杂多面结构件的机器人精准柔顺装配技术研究报告 1 份；
- (3) 基于机器人柔顺控制的隔框自动化装配定位工艺方案 1 份；
- (4) 申请发明专利 1 项，发表论文 1 篇。

## 二、移载柔性对接

### 6. 移载定位器力位混合控制技术研究

#### 项目背景：

随着飞机对接工艺装备技术的发展，为满足飞机产品订单波动带来的混线生产需求，移载定位器将在 C919 批生产线中大规模使用，除了基本的调姿对接，移载定位器还将承担大部段的转运任务，在采用多个移载定位器协同转运大部段的过程中，受限于地面平整度不理想及多定位器之间协同运动存在误差等因素，各个定位器之间的相对位置关系存在一定波动性，易造成大部段因位姿突变而导致应力集中或突变等问题，引起产品局部形变甚至破坏，为实现移载定位器低应力协同运输，需结合实际运输工况，研究基于力位混合控制方法，主动消除应力集中与突变，保障大部段的安全运输。

#### 项目目标及技术指标：

##### 项目目标：

本项目针对飞机大部段采用移载定位器进行低应力协同运输的需求，开展基于复杂工况自识别的动力学建模、力位混合运动控制、基于全局定位的自适应低应力协同运输等关键技术攻关，搭建移载定位器协同运输全局定位系统，开发力位混合协同运输控制算法，开展不同工况下的协同运输试验验证，实现移载定位器低应力协同运输，为 C919 移载柔性产线建设提供技术支撑。

##### 技术指标：

- (1) 移载定位器受力识别精度不低于 $\pm 1\%$ ;
- (2) 移载定位器全局定位精度不低于  $0.2\text{mm}+0.01\text{mm/m}$ ;
- (3) 移载定位器协同运输过程中航向和展向受力均不超过  $1000\text{N}$ ;
- (4) 技术成熟度从 TRL4 提升至 TRL6。

### 主要研究内容:

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 基于复杂工况自识别的动力学建模

研究基于多传感融合技术, 自动快速识别移载定位器轮系、负载、地面状况等动力学参数, 构建基于移载定位器负载与协同约束条件下的力学与动力学模型。

##### 2) 力位混合运动控制算法

研究基于力和位置的双重反馈, 开发移载定位器协同运输控制算法, 实现移载定位器运输过程中的实时动态调整。

##### 3) 基于全局定位的自适应低应力协同运输

研究 IGPS 等全局定位方式, 通过移载定位器高精度协同运动控制, 实现大部段低应力高精度协同运输。

#### (2) 研究结果的验证方式

基于已有的移载对接试验平台进行力位混合协同运输验证。

### 预期成果:

- (1) 移载定位器全局定位系统 1 套(含至少 4 个发射基站);
- (2) 移载定位器力位混合控制算法 1 套;
- (3) 移载定位器协同运输试验验证报告 1 份。

## 7. 移动基座与定位器刚度匹配设计技术研究

### 项目背景：

移动转运平台和定位器结构一体化是未来民机对接工艺装备发展的趋势，C919 新一代柔性产线将大量采用移载式定位器，区别于传统的固定式定位器，定位器固定于移动基座，这种结构形式大大降低了整体的刚度和稳定性，给大部件的运输和调姿对接带来很大的不确定性，影响飞机大部件的安全运输和高精度对接，因此，移载定位器在结构设计时，移动基座与定位器的刚度需合理匹配，确保飞机大部件在运输过程中保持一定的柔性，同时满足高精度的调姿对接要求。本项目拟针对大部件的转运工况和装配工况，研究移载定位器集成结构的刚度、阻尼等特性，提出刚度匹配设计优化方法，实现基于移载定位器的大部件低应力高精度转运和对接装配。

### 项目目标及技术指标：

#### 项目目标：

本项目针对移载对接装备刚度匹配设计需求，基于现有移载对接试验平台，开展移载 AGV 轮系结构刚度及布局分析、机构运动副接触刚度简化分析、移动基座与定位器刚度匹配优化设计等关键技术攻关，研究在转运工况和装配工况下移载定位器的刚度计算方法，开展移载定位器刚度试验验证，形成移动基座与定位器刚度匹配设计优化方案，为移载定位器结构设计提供技术支撑。

#### 技术指标：

(1) 转运工况，在 2T 载荷作用下，定位器竖向偏转角度不

大于  $0.5^{\circ}$  ；

(2) 装配工况，在 2T 载荷下，定位器-飞机连接球头位移不超过 0.5mm；

(3) 动态性能测试系统可实现至少 12 个通道的振动数据采集，支持模态分析。

### 主要研究内容：

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 移载 AGV 轮系结构刚度及布局分析

基于现有的移载对接试验平台，开展 AGV 平台的麦克纳姆轮系结构刚度分析，并优化轮系布局。在满足支撑载荷的同时，确保在转运过程中整体结构具备足够的刚度和强度，满足转运过程中的重载要求。

##### 2) 机构运动副接触刚度简化分析

研究移载定位器的各类机构运动副，建立其简化模型以进行有限元刚度分析，形成整体刚度计算方法。

##### 3) 移动基座与定位器刚度匹配优化设计

基于现有的移载对接试验平台开展刚度试验，根据飞机部件产品的刚度特性，合理设计和优化移载定位器在各自由度方向上的刚度值，实现低应力装配。

#### (2) 研究结果的验证方式

基于现有的移载对接试验平台，在转运和装配两种工况下，通过动态性能测试系统验证移动基座与定位器刚度。

### 预期成果：

- (1) 移动基座与定位器动态性能测试系统 1 套；
- (2) 机构运动副刚度简化模型报告 1 份；
- (3) 麦克纳姆轮几何分析和布局分析报告 1 份；
- (4) 转运工况下的动力学分析研究报告 1 份；
- (5) 转运/装配工况下的结构变形分析报告 1 份；
- (6) 移栽定位器刚度匹配设计优化方案 1 套；
- (7) 发表论文 1 篇。

## 8. 基于点阵相机的动态全局测量技术研究

### 项目背景：

近年来，我国的航空工业有了巨大的发展，与之相应的，对产品生产装配精度与效率要求也越来越高。传统方式中，多采用跟踪仪系统作为主要测量方式，但每次需要花费较长时间进行设备架设、坐标系统一等准备工作，对于全局测量时又需要多设备联机或转站测量，导致测量效率较低、系统控制较为繁琐，并且跟踪仪为单目标测量，对于转运、装配等过程中的多目标监测需求而言，测量效率会进一步的损失。为此，本研究项目提出采用测量站的概念，通过摄影测量技术，利用点阵式分布的多台工业级测量相机，结合测量相机全视场测量的特点，构建出一个全局动态测量站，能够同时对全局范围内的可视目标进行测量，实现特定目标点坐标、部件位姿、目标点形变量、AGV 定位等需求的动态测量，同时还能够为扫描仪等其他测量设备提供一个全局基准。

## 项目目标及技术指标：

### 项目目标：

针对飞机装配过程中测量转站多，单目标测量效率低，多目标监控困难等问题，开展基于多相机的组网标定、全局测量精度在线评估、多目标动态测量等技术研究，开发基于点阵相机的动态全局测量系统，实现测量站内所有可视目标三维坐标的动态测量及部件位姿、AGV 定位等信息数据的获取，指导部段调姿对接。

### 技术指标：

- (1) 定位精度：在 15m\*10m\*5m 范围内，精度不低于±(15um+15um/m)；
- (2) 测量速度最高支持 10Hz；
- (3) 通过外部控制场能够实现测量坐标系与全局坐标系的自动统一；
- (4) 支持点阵相机的快速自动化标定，单次标定时间不超过 20 分钟；
- (5) 支持测量系统与 AGV 转运车的数据互通；
- (6) 技术成熟度从 TRL4 级提升到 TRL6 级。

### 主要研究内容：

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 基于点阵相机的组网与测量误差控制技术

研究点阵相机的组网技术，测量场误差分布及补偿方法，实现点阵相机的快速组网与高精度测量。

##### 2) 测量图像数据加速处理技术

针对测量相机多、图像数据量大等问题，研究图像数据的 GPU 加速、分布式计算等数据加速处理方法，实现测量图像的高速处理。

### 3) 全局测量场构建与精度评估技术

研究相机坐标系与全局坐标系的转换算法，实现相机坐标系、移栽式定位器坐标系等实时转换，并评定转换精度与有效性，形成测量场构建规范。

### 4) 基于点阵相机的动态跟踪技术

研究点阵相机的多目标动态监测技术，实现部段位姿，AGV 定位等信息数据在线获取，指导部段调姿对接。

#### (2) 研究结果的验证方式

针对翼身对接模拟件进行现场测试验证，验证内容：使用工业摄影测量系统实现移栽式定位器坐标系、部件位置姿态数据的实时获取与转换。

#### **预期成果：**

(1) 开发点阵相机动态测量软件，结合现有设备并增设一套相机（2 个），组成一套完整的系统样机；

(2) 基于点阵相机的动态全局测量技术研究报告 1 份；

(3) 基于点阵相机的动态全局测量站试验件的测试验证报告 1 份；

(4) 基于点阵相机的全局测量场构建规范 1 份。

### 三、智能精益总装

#### 9. 狭小空间内配电盘箱类重型设备自动装配技术研究

##### 项目背景：

目前 C919 飞机的配电盘箱类设备通过起吊工装进行安装，起吊工装安装于上方地板横梁上，安装该工装耗时 2 个小时。工装吊起设备后，人工推到设备安装固定点，由于配电盘箱位于电子设备架下方，工装无法完全移动到安装固定点，需要 3 人手工推到紧固件固定点，此时设备处于不稳定的提拉状态，设备下方的 3 个紧固件的孔无法完全对齐，通过人工不断调整设备位置，对齐过程耗时较长，安装固定孔找准后，迅速安装螺栓并拧紧，由于螺栓孔可能存在没有完全对齐，需将螺栓强制插进孔中，安装过程存在暴力安装，造成紧固件损伤。整个安装耗时 5~6 个小时，需要至少 4 个人参与。由于操作空间受限且设备较重，安装难度较大，需要一种能在狭小空间中的大重量设备的自动安装设备，将设备托举到固定位置，使得设备结构和接头完全对齐，且能将紧固件穿过接头进行连接。实现配电盘箱的自动装配，加快设备安装过程，减少紧固件损伤，提高安装效率，降低人工成本。

##### 项目目标及技术指标：

###### 项目目标：

针对 C919 飞机的配电盘箱设备的自动装配需求，以配电盘箱安装过程为主要研究对象，考虑在中 EE 舱中安装时的狭小空间，需要设计一种大重量托举的自动安装设备，将配电盘箱移动到安

装位置。研究螺栓识别对孔技术，实现紧固件的自动对接，基于螺栓连接位置自动调整配电箱姿态，大重量设备稳定姿态的调整，设计控制系统，实现将配电箱设备结构和接头完全对齐，并在固定位置托举，且能将紧固件穿过接头进行连接，加快配电箱安装过程，减少紧固件损伤，提高安装效率。

技术指标：

本项目希望达成以下技术指标：

(1) 狭小空间全方位自动移动，在高 1.5、宽 2 米的货舱内将配电箱移动到安装处；

(2) 自动检测安装位置，调整配电箱姿态，横滚方向  $0 \pm 0.5^\circ$ ，俯仰方向  $0 \pm 0.5^\circ$ ，使配电箱的紧固件与固定处对齐；

(3) 额定承载  $\geq 150\text{kg}$ ；

(4) 自动识别螺栓孔位置，轴向偏差 0.5mm；

(5) 技术成熟度由 TRL3 到 TRL6。

主要研究内容：

(1) 拟解决的关键技术

1) 高刚度高可靠机构设计

针对配电箱安装过程，研发适用于配电箱安装的调姿机构，能够控制机构在货舱中的自由移动，在满足装配系统各种驱动要求、刚度要求和安全保障要求的前提下，优化结构设计，实现机体轻量化设计，满足高精度控制要求。

2) 孔识别自动定位技术

研发配电箱安装螺栓孔自动识别算法，对配电箱螺栓孔

与固定螺栓进行识别，计算孔轴向偏差，通过激光、视觉等传感器及先进的定位算法，实现自动避障，实现执行机构的精确定位和自锁。

### 3) 柔性智能化调姿技术

定位调姿微调过程中，通过各承力接头位置、载荷传感器的反馈信息，结合测量跟踪技术，计算出配电盘箱调姿轨迹，由伺服驱动控制系统实现配电盘箱的精确自动定位调姿；调姿过程中实时检测各传感器状态，避免安装过程中配电盘箱和飞机本体损伤。

#### (2) 研究结果的验证方式

配电盘箱安装系统在搭建的货舱模拟工况或 C919 真机上进行应用验证。

#### **预期成果：**

- (1) 研发配电盘箱自动装配设备一套；
- (2) 形成配电盘箱智能装配系统使用的操作手册 1 篇；
- (3) 各相关单元设计报告、图纸、技术报告、试验报告等技术文件。

## 四、集成网络测试

### 10. 终端小型化多点无线绝缘测试技术研究

#### 项目背景：

电气线路互联系统是飞机的神经网络，是连接供配电、机电设备、电子设备和控制系统的重要信息通道。为保障飞机电缆的正常工作，在功能试验前需要对全机电缆进行测试。飞机上的电缆数量庞大，目前 C919 大型客机的全机电缆测试采用转接电缆连接的方式进行。由于 C919 机上连接器、设备端布局分散，且数量较多，而测试模块则相对笨重、灵活性低，因此在整个电缆测试中存在安装转接电缆耗费时间长、检测效率低等问题。为解决上述问题，急需设计一种便携式多点无线导通绝缘测试系统，提高电缆的检测效率。

#### 项目目标及技术指标：

##### 项目目标：

设计一种基于无线或 5G 通信的嵌入式智能导通绝缘测试系统，解决目前 C919 飞机电缆导通绝缘测试效率低和转接电缆冗长等一系列问题。该系统终端小巧、便于移动，具有自动测量、自动校准、自动判别测试结果等功能。同时具备与上位机 PC 通信的功能。为实现全机电缆无线测试提供有效的技术支撑。该项目研制成果预期应用在 C919 140 工位开展全机电缆完整性测试，或应用在部段开展电缆完整性测试。

##### 技术指标：

本项目预计达成以下技术指标：

- (1) 系统能够提供测试电压达到 500V；
- (2) 系统采用便携式设计，能够进行多点测量（至少 128 点，可扩展）；
- (3) 能够支持在线校准；
- (4) 绝缘测试精度在 5%以内，测试准确度 100%；
- (5) 绝缘电阻测试范围在 0.1M 欧~100M 欧；
- (6) 导通测试电阻范围在 0-8 欧，精度 $\pm 1\%+0.1$  欧（两线法）；
- (7) 系统通信采用无线 wifi 或者 5G 方式；
- (8) 将技术成熟度从 TRL3 级提升至 TRL6 级；

**主要研究内容：**

(1) 拟解决的关键技术

1) 智能航插接口设计

设计多功能矩阵开关，使其具有 128 个开关测试点，开关速度为 us 级，导通电阻较低，同时其具有良好的可扩展性，可以通过级联方式增加测试接口数量。主要技术难点在于航插接口的识别以及导通电阻，接触电阻以及线缆电阻的消除。

2) 高压发生技术

通过一定的设计方式，设计和实现在一定体积空间内的 500V 高压发生电路。主要技术难点在于在采用程控的方式对相应的高压电路进行无缝对接以及电压、电流的稳定输出。

3) 绝缘电阻测试技术

研究国内外绝缘电阻测试相关技术，对绝缘电阻测量原理进行归纳分析，提出绝缘电阻相应的采集参数量，然后采用新型设计方法如阻抗变化、惠斯通电桥等对被测绝缘电阻进行研究，通过对被测线路两端施加高压，得到相应的电参量。主要技术难点在于四线测试过程中标准电阻的温漂误差处理以及恒流源的设计。

4) 无线导通绝缘测试中多点切换、数据采集及无线传输技术

当相应的电参量得到后，通过设计和研发嵌入式系统对相应的电参量进行信号调理和放大，然后通过模数转换系统进行数据采集。另外，由于飞机线缆数量众多，系统中设计多点切换系统，可以对相应的测试线缆进行测量，最后系统测量的结果通过无线或者 5G 的方式传到上位机平台。主要技术难点在于嵌入式系统对多点切换、数据采集以及数据无线传输的自动化控制。

## (2) 研究结果的验证方式

通过硬件和软件的联调在分部段机翼平台进行验证。

## 预期成果：

(1) 便携式多点无线导通绝缘测试系统一套（包含硬件和软件）；

(2) 技术报告、测试报告等文件。

## 五、定制分色喷涂

### 11. 热力耦合作用下机器人打磨去除机理及去除量可控方法研究

#### 项目背景：

飞机喷漆前表面打磨是飞机制造过程中的重要工序。人工打磨对工人技术要求高，打磨噪声、粉尘等环境因素对人伤害大，并且由于工人个人能力、随工作时间的体能变化等影响，难以保证打磨质量的稳定性，尤其是难以保证打磨过程中打磨去除量的控制。国内在民机涂装前表面准备过程中，存在打磨场景多、工况复杂、无量化接收指标等问题。相较传统的手动加工，机器人自动化加工表现出了良好的加工精度和极高的加工效率。并且，对于飞机加工领域等在打磨加工厚度与一致性必须满足设计需要，机器人打磨精度控制以及薄壁铝合金零件的磨削加工热-力耦合造成的变形控制是当前亟待解决的关键技术难题。

前期自动打磨研究主要针对关键影响工艺参数、工艺窗口确定、去除量计算与预测。在试验验证厂房具备自动化打磨装备能力后，需进一步开展自动打磨去除机理与损伤抑制、去除量的精准控制等方面的研究，促进工程化应用。

#### 项目目标及技术指标

##### 项目目标：

研究机器人高精度打磨过程中力热耦合机理，解析力效应与热效应对打磨精度的影响。通过工艺研究，实现机器人高精度打

磨加工，实现适用于民用飞机的铝合金等金属材料、蒙皮表面的高精度打磨活化与去漆。

技术指标：

(1) 机器人打磨过程工件无热变形，打磨后不引入划痕、磕碰凹坑等损伤；打磨漆层时，应无目视可见的基材暴露或其他表面损伤；

(2) 机器人打磨去除量精度优于 0.006mm；

(3) 机器人打磨引入的残余应力、机械性能影响优于手工打磨；

(4) 可打磨材料包括铝合金和钛合金；

(5) 机器人打磨技术成熟度提升至 TRL6 级。

主要研究内容：

(1) 拟解决的关键技术

1) 机器人打磨热力耦合机理与基材影响规律研究

在机器人打磨过程中，打磨力的改变会造成磨削热的改变，同时打磨力和打磨热均会造成工件的应力的积累。为此，需要在磨削力与磨削热的耦合作用下，对残余应力的影响进行分析。并基于力热耦合效果选择合理的打磨工艺参数。通过研究获得自动打磨关键影响因子，综合评估打磨前后表面质量、静力性能、残余应力等获取自动打磨对铝合金性能影响规律，为后续工艺参数库和模型库提供数据基础。

2) 机器人打磨去除工艺与变形控制研究

为了实现曲面材料的高精度去除技术，就要在精准控制机器

人的加工轨迹的同时控制好加工工艺参数，做好对材料去除的控制。对加工轨迹重合部分材料去除进行分析的过程中，将材料去除机理视为线性叠加，并在此基础上，对加工轨迹间距的计算进行分析。要求加工轨迹重叠区域的磨削深度与轨迹线上的磨削深度差值尽可能减小，使得加工区域的加工残差最小化，由此产生目标优化函数，求解得到加工残差最小时的加工轨迹间距，进而实现自主轨迹规划。

在这个过程中对打磨压力的控制就显得尤为重要。作为加工去除量的重要影响因素之一，在加工过程中控制好加工过程中的打磨力的大小对精准的控制材料去除量、保证磨削表面的质量至关重要。

### 3) 机器人打磨低去除量控制与视觉检测技术研究

在面对漆层打磨或表面抛光等表面去除量较小的去除工作时，往往对机器人加工的精度要求更高，此时使用传统的磨削轨迹规划方法或者传统的磨削工艺模型进行加工过程规划就很难达到低去除量加工时的加工要求，因此就需要找到一种可以更加均匀去除的轨迹规划方法。

在打磨轨迹类型确认以后，则需要选择相应打磨工具、打磨工艺参数来保证工件表面的精度。在进行选择的时候，首先需要研究各种磨削工具的材料去除模型，找出符合低去除量、高精度加工的磨削工具，然后可以使用正交实验法，对磨削去除量、表面质量、等参数及其影响因素进行分析，找出影响加工效果的主要因素并加以控制。通过机器视觉，实现打磨去除量的精准检测。

## (2) 研究结果的验证方式

研制视觉定位及检测设备集成在上飞公司自动打磨系统上，开展带漆层铝合金双曲曲面典型件测试验证。

### 预期成果：

(1) 视觉定位、检测设备一套（含相关检测软件），视觉定位检测设备应能与自动化打磨装备兼容；

(2) 机器人高精度打磨加工试验报告 1 份，去除量控制研究报告 1 份；

(3) 机器人高精度打磨加工工艺说明书 1 份，自动打磨质量检测标准 1 份；

(4) 残余应力测试与分析报告 1 份，机械性能测试与分析报告 1 份；

(5) 申请发明专利不少于 1 项。

## 12. 基于曲面的无遮蔽定制分色喷漆设备研制

### 项目背景：

飞机不同图案的造型不仅是航空公司的“身份证”，航空公司可以通过飞机的定制化外观将公司的文化理念以及不同的节日主题展现给乘客，因此飞机涂装对外观涂装的定制化和个性化的需求越来越强烈，涂装的复杂性也越来越高，涂装面临的挑战也越来越大，而个性化的涂装在传统涂装中主要通过人工一层一层的建立图案色彩，需要通过不同颜色涂料的反复喷涂、干燥、保护步骤，涂装图案的复杂度有限且涂装效率低下。

无遮蔽定制分色喷涂技术主要是通过采用微滴喷射原理，通过无遮蔽的方式涂装出多色复杂图案。目前空客在无遮蔽喷涂领域已经针对飞机机身大壁板开展验证试验，国内对该项技术仅处于初步研究阶段。无遮蔽定制分色喷涂在喷涂过程中避免了反复保护和干燥极大的节约了人力物力；且涂料利用率高，可以实现复杂图案喷涂，迅速响应客户需求；此外喷涂过程无涂料雾化，符合清洁生产方式。因此，开发一套定制分色涂装设备用于飞机表面图案涂装并对该技术开展进一步研究十分必要。

### 项目目标及技术指标：

#### 项目目标：

针对飞机复杂零部件曲面上多色图案喷涂的精细喷涂需求，本项目拟对无遮蔽定制分色喷涂专用喷漆设备进行开发，为实现典型曲面上复杂图案的无遮蔽、自动化精准喷涂提供专用喷漆装备，通过典型曲面试验件的喷涂试验，验证无遮蔽喷漆的技术可行性，为后期的工程化应用奠定基础。

#### 技术指标：

- (1) 喷涂设备定位精度不低于 $\pm 0.06\text{mm/m}$ ；
- (2) 设备快移速度不低于 $12\text{m/min}$ ；设备空间可达性不低于 $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 300\text{mm}$ ；
- (3) 可实现喷涂所需的空问轨迹运动控制与精密喷涂控制的同步控制功能，运动控制分辨率达到 $0.001\text{mm}$ ；
- (4) 可实现曲面多色图案无遮蔽喷涂，喷涂图案不同色域边缘清晰度高，无过喷；涂料利用率达到90%以上。

(5) 技术成熟度从 TRL3 提升至 TRL5。

### 主要研究内容：

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 定制分色涂装系统设计和制造

在进行喷涂设备机械结构设计时，通过受力分析、末端承载变形分析、模态分析、运动精度分析、工作空间分析、前期设计经验总结和仿真优化相结合，保证设备在高速喷涂过程中机械臂末端的运动学性能和动力学性能，以保证精密喷涂需求。

##### 2) 运动控制和喷头控制二者同步控制的复合型控制实现技术

研制专用设备的复合控制系统，实现喷涂所需的空间轨迹运动控制与精密喷涂控制的同步控制功能，最高运动控制分辨率 0.001mm；同时进行用户操控系统软件界面的开发和设计，使其具有喷涂工艺控制参数设置、喷涂程序读取、设备运行状态显示等功能，集成硬件和软件后进行上机调试以及控制系统稳定性长时间连续运行调试。

##### 3) 喷涂设备专用的电气系统设计及实现技术

研制喷涂设备专用的电气系统，包括运动驱动、信号调试、安全防护、电磁兼容等技术内容；电气柜强弱电分离，通过稳压技术、电磁屏蔽技术、强制冷却技术令电气柜工作状态平稳；根据人机工程学，对操作面板按钮的分布进行合理布局，并结合喷涂系统特性，对按键进行简化设计，达到易于操作的目的；电气柜采用模块化设计，并且喷涂设备主体与电气柜的传输线通过工业级快插接头连接，可与喷涂设备主体拆分，易于后期维护。

## (2) 研究结果的验证方式

已设备验收的方式开展设备精度、运动速度、行程等指标的符合性测试，涂料利用率通过涂装试验验证并计算结果，并且通过结项评审会验证技术工作的完整性。

### **预期成果：**

- (1) 无遮蔽定制分色涂装系统一套；
- (2) 无遮蔽定制分色涂装设备操作手册一份；
- (3) 无遮蔽定制分色涂装设备研制报告一份；
- (4) 无遮蔽定制分色涂装设备鉴定要求初稿一份；
- (5) 带有复杂图案的曲面典型件一件。

## 六、多场云化测量

### 13. 大型航空装配测量场的自规划校准与精度在位评估技术研究

#### 项目背景：

近年来，数字化测量数据驱动的对接装配技术被广泛应用于飞机零部件的高精度装配，促进了装配效率、精度的提升与异地产线协同制造。该技术的核心是“产品-工装-仪器-加工设备-数模”数据的精准传递与精度评估。大型航空装配测量场是多源几何数据传递的唯一桥梁，因此其测量精度、效率及可靠性直接关系到装配质量。基于激光跟踪仪/工业摄影的测量场构建技术已应用于组件、部件与整机对接装配。目前，大尺寸测量场的标定与校准过程存在以下三个问题：（1）精度评价指标单一：测量场校准精度的评判主要依赖人为经验，仅依靠公共点转站误差为指标，评价指标单一，缺乏全面的精度评价指标；（2）测量布站依赖人为经验：测量站位布置依赖人为经验，主要以 ERS 坐标全部获取为目标，倘若工装遮挡测量视线，须临时增加站位数量与转站次数，精度与效率下降，缺乏预先遮挡判别、整体误差小为目标的站位仿真规划。（3）缺乏测量场专用性软件：目前尚缺乏为测量场量身定做的工艺软件，现使用的软件功能庞大繁杂、针对性不强，需要深度的人员技术培训，才可使用现有软件中的所需功能，大大增加了培训成本、提高了错误率。综上，本项目拟提出航空装配测量场自规划校准与精度在位评估技术，借助激光跟踪仪、

工业摄影等大尺寸测量仪器，采用综合的评价指标体系、站位规划算法与相应自开发软件模块实现测量场的高精度校准与评估。本研究项目中需综合考虑仪器误差特性、坐标误差特性、转站误差特性、现场环境特点等，建立定量指标与定性指标结合的测量场精度综合评价指标；结合测量场分布、工装等现场遮挡情况，开发适用于现场的测量视线遮挡判别功能和测量站位自主规划功能；针对测量场构建中所需要的测量、数据处理功能，自主针对性、专一性强的软件模块，且精度不低于现有 SA 数据处理精度。通过上述研究，突破依赖人为经验的测量场构建、校准方法，切实提高部装/产线等测量场校准精度、效率与可靠性。

#### **项目目标及技术指标：**

##### **项目目标：**

本项目针对部段装配站位或产线中测量场标定、校准及长时间维护过程中测量精度、效率、可靠性的技术要求，设计一套适用于激光跟踪仪/工业摄影构建测量场的综合精度评价指标，实现测量场精度的全面综合评价；结合现场环境复杂性，开发测量视线遮挡判别的测量站位规划软件，实现测量站位的自主仿真规划，解决现场视线遮挡导致站位增多、转站次数增加而精度降低的问题；考虑测量场构建过程中所需的数据获取、多源设备数据融合、数据处理等技术需求，开发一个针对性强、切合测量工艺、专用于测量场构建与精度评估的软件模块，实现测量场构建过程中软件模块的国产化。

##### **技术指标：**

(1) 测量场内 ERS 点坐标定位精度优于 $\pm 0.1\text{mm}/15\text{m}$ ;

(2) 开发一个适用于测量场数据采集、处理与结果可视化的专用性软件, 综合精度评价类相关性图表 3~4 个, 操作步骤简化至 5 项、20 步以内;

(3) 可支持激光跟踪仪、工业摄影、双目视觉等至少 3 种测量仪器的通讯与数据处理等功能;

(4) 以机头-前机身、中机身-机翼等工位为典型工程应用场景, 开发一个适用于复杂装配场景的虚拟规划与三维可视化软件, 实现遮挡站位提前预判及规划, 将现有测量场标定与校准的实施时间缩减 1/4 以上。

(5) 技术成熟度从 TRL4 级提升到 TRL6 级。

### 主要研究内容:

(1) 拟解决的关键技术

1) 测量场精度快速综合评价技术

结合国际/国家计量标准, 研究适用于装配现场的测量场精度多指标快速综合评价方法, 实现测量场精度的快速评价;

2) 多源数据基准统一与数据融合技术

研究测量场内测量坐标系、工装坐标系、产品坐标系等多坐标系基准统一; 实现不同坐标系内关键数据的快速统一。

3) 测量视线遮挡判别技术

研究复杂现场内测量仪器视线遮挡情况的仿真判别技术, 实现测量视线遮挡判别的测量站位辅助预规划技术。

4) 测量数据采集与数据处理软件开发技术

研究专用于测量场的激光跟踪仪/工业摄影等多源测量数据采集、处理与数据结果可视化呈现技术，实现软件操作的简单化、专一化、界面友好化。

#### (2) 研究结果的验证方式

在部装车间/产线，使用开发完成的多指标综合评价与多源数据统一方法、测量视线遮挡判别软件模块、数据采集与处理软件模块，满足现场车间内测量场使用的需求，相关精度指标由第三方资质机构检定。

#### 预期成果：

(1) 应用于部装/产线等测量场构建过程中测量视线遮挡判别软件模块；

(2) 适用于激光跟踪仪/工业摄影的数据采集、处理与数据结果可视化软件模块；

(3) 软件运行终端一套；

(4) 形成测量场标定、校准、长时间维护等详细技术研究报告一份；

(5) 形成测量场多指标综合评价技术规范与流程报告一份；

(6) 申请发明专利 1 项。

### 14. 基于点云-网格关联的装配形性预测与工艺优化

#### 项目背景：

飞机结构件尺寸大、几何复杂、刚性弱，装配协调因素多、关系复杂，技术难度大。在实际装配中，常常需根据实际工艺状

态,针对外形和交点协调进行工艺优化调整,对于大部件对接,还需兼顾装配力控制。传统的“反复试装+修配”依赖人力和经验,费时费力,工艺质量难以保证。随着数字化测量和数值仿真的发展,虚拟预装配技术应运而生,其可在不进行实物装配前提下,通过仿真预测装配工艺状态,优化调姿、校形、加垫/打磨等工艺,大幅提升装配协调的质量和效率。

当前虚拟预装配方式主要是基于实测点云的刚性拟合,未考虑实际装配中由重力、装配力引起的变形效应,变形仿真结果与实际偏差较大,且无法反映装配受力状态,对实际装配协调工艺的指导非常有限。当前预装配方法无法实现装配状态的高精度预测,亟需开展新技术研究,提升装配预测准确度,减少人工试装试配工作量。

### **项目目标及技术指标:**

#### **项目目标:**

针对飞机结构尺寸大、刚性弱、协调关系复杂,无法实现装配变形与受力状态高精度预测等问题,开展基于网格关联的高精度快速建模、考虑变形效应的装配形性预测、基于柔性虚拟预装配的多目标协调优化等关键技术研究,开发装配形性预测与工艺优化系统软件,实现装配变形与受力状态高精度预测,提高装配质量和效率。

#### **技术指标:**

(1) 针对实际装配对象建立的有限元网格模型与实测点云相比,几何偏差 $\leq 0.2\text{mm}$ ;对于单个零件,最大支持的有限元网格单

元规模 $\geq 1$ 万。

(2) 装配变形预测准确度 $\geq 90\%$ 、装配力预测准确度 $\geq 80\%$ ；对于有限元网格单元数量为 1 万的部件，装配仿真分析计算时间 $\leq 30$ 分钟。

(3) 技术成熟度从 TRL3 级提升到 TRL5 级。

### 主要研究内容：

#### (1) 拟解决的关键技术

##### 1) 基于点云-网格关联的结构高精度快速建模

面向装配协调，研究点云与网格快速精确关联技术，开发基于点云的有限元快速建模算法，实现面向装配协调的结构高精度、自动化有限元建模技术。

##### 2) 考虑变形效应的装配形性预测

研究考虑重力、装配力、接触力等载荷作用的柔性虚拟预装配技术，精确预测结构装配协调过程中的变形、受力状态，以及装配间隙几何形状。

##### 3) 基于柔性虚拟预装配的多目标协调优化

基于柔性虚拟预装配，开发智能优化算法程序，研究面向装配几何/力协同控制的装配协调工艺多目标优化技术，确定最优装配工艺。

#### (2) 研究结果的验证方式

选取典型工艺对象，使用所开发的装配形性预测与工艺优化系统进行工艺试验，与实际装配结果进行对比验证，并通过项目结题评审会验证技术工作的完整性。

### 预期成果：

- (1) 装配形性预测与工艺优化系统软件 1 套（含相关源程序或代码）；
- (2) 软件运行终端一套；
- (3) 基于点云-网格关联的装配形性预测与工艺优化研究报告 1 份；
- (4) 申请发明专利 1 项，申请软件著作权 1 项。

## 15. 云端大数据处理与管理平台

### 项目背景：

飞机产品的精度标准越来越高，对精确制造、精准装配、精密检测工作提出了更高的要求。随着数字科学与仪器技术的发展，各类数字化测量与传感技术已开始应用于飞机生产和运维全生命周期中。如：（1）飞机生产状态监测，包括产线设备与环境数据（温湿度、风速、振动、人员分布、工装信息）、飞机状态数据（空间位置、姿态、形变）等；（2）飞机制造质量检验数据，包括飞机全表面外形检测、关键零部件数量检测、缝隙检测等。

以上各类信息，形成了空间、环境、产品、仪器、人员多维一体海量数据。该数据体量巨大，使得其储存、处理、分析与展示面临着严峻挑战。本研究项目主要通过数据结构理论创新与方法优化，解决海量数据的分类存储、多源调用、融合解算、远程渲染、快速加载等问题，为后期基于云端大数据的产品质量追溯、质量分析等应用需求奠定软件基础。

## 项目目标及技术指标：

### 项目目标：

本项目针对制造现场多源海量数据，建立云端大数据综合处理平台，使得现场全数据信息可以通过平台进行分类存储、同步管理与多源调用。可通过平台实现云端海量数据的融合解算、分析与预测功能。平台具备远程渲染和快速加载技术，可以通过网页系统在线浏览和分享数据。

### 技术指标：

(1) 提供一站式大数据集成开发环境，支持对企业 ERP、MES、SAP 等业务数据和 IOT 数据的接入和同步，提供数据集成、数据开发、运维中心、数据地图、数据质量、数据模型等功能；

(2) 支持对数据服务 API 进行全生命周期的管理，面对不同业务部门的数据请求，可快速响应和监督管理，极大提高企业数据服务化的效率和能力；

(3) 支持加载常用的点云文件格式，如\*.txt、\*.xyz、\*.vtk、\*.pcd、\*.obj 等；

(4) 支持边缘端预加载技术，对应用中超大点云数据集，边缘端预加载策略下的终端数据呈现响应时间 $\leq 6$  秒，实时加载场景下，终端等待时间 $\leq 30$  秒；

(5) 终端三维场景交互式实时渲染帧率 $\geq 20$  帧/秒，对常用点云数据集单渲染节点支持 $\geq 10$  路高并发；

(6) 技术成熟度从 TRL3 级提升到 TRL5 级。

### 主要研究内容：

## (1) 拟解决的关键技术

### 1) 多元异构数据资源管理技术

研发一站式从数据接入到数据消费全链路的数据资源管理平台，助力打造标准统一、融会贯通、资产化、服务化、闭环自优化的数据资源管理体系，以驱动创新。基于分布式技术，支持动态扩展存储和计算节点，以满足不同规模的业务需求。

### 2) 超高精度点云快速渲染技术

研究三维数据格式优化技术，解决大体积高精度激光点云数据的快速渲染显示问题，并且降低对计算机显卡硬件环境的依赖。

### 3) 超高精度点云流式渲染和加载技术

研究通过网络带宽远程渲染三维数据，在最大 5 兆带宽环境下流畅运行系统。

### 4) 高精度点云中央存储与管理技术

研究通过云存储的技术，将海量的高精度三维数据进行中央存储，并建立管理和用户权限控制体系，对数据进行集中管理和使用。

## (2) 研究结果的验证方式

在内部网络环境下，搭建完整的云端大数据处理与管理平台，平台具备对激光数据的上传以及分类管理基础功能，可通过网络环境在线远程浏览和分享数据，并满足要求的技术指标参数。

### 预期成果：

(1) 开发点云数据处理系统软件一套；

(2) 开发多源异构数据资源管理平台一套；

(3) 平台运行服务器一套；

(4) 软件系统功能测试验证报告 1 份。

## 16. 基于 2D 投影的隔音棉辅助剪裁系统开发

### 项目背景：

近年来，我国的飞机制造水平发展较快，飞机制造中各个工序对质量、效率和可靠性都有了更高的要求。在飞机制造装配技术领域，隔音棉的敷设是一项工作量大，种类繁多且涵盖范围广的装配工作，在隔音棉的制造过程中，需要对其进行不同形状和尺寸的剪裁。目前主要依靠打印 1:1 比例的样板进行剪裁，耗时耗力耗材，不利于大飞机产线降本增效。基于上述需求，研制一套可视化系统代替传统样板进行隔音棉铺设。

本研究项目中主要研制一套基于 2D 投影的隔音棉辅助剪裁系统，其可以结合数模将加工信息直接上投射到加工工件上，指导工人进行准确可靠的加工。这种方法投射位置准确可靠、操作简单、效率高成本低，可以明显提升飞机装配效率和可靠性。

### 项目目标及技术指标：

#### 项目目标：

本项目针对飞机隔音棉制作过程中的技术需求，研究隔音棉加工数模的解析与可视化编辑，投射工艺过程的编辑与发布，投影仪校准定位及加工信息投射等技术，开发二维白光投影系统，结合现有投影硬件，实现剪裁边界在隔音棉表面的快速投射，指导工作人员裁剪，提高隔音棉制作效率，降低样板耗材使用。

技术指标：

- 1) 单台设备最大投射距离与投射比：最大投射距离不低于 5 米，投射比不低于 1.35，投射角度  $40.5^{\circ} \times 26^{\circ}$ ，支持多台协同投影；
- 2) 能够导入并解析 Catia 原生模型文件，并提取模型中的加工信息；
- 3) 投射设备分辨率不低于  $1920 \times 1200$ ，亮度不低于 6000 流明，投影仪定位精度优于 0.5Pixel，姿态定位重复精度优于  $0.03^{\circ}$ ；
- 4) 能够实现在模型指定位置镶嵌文字，直线，圆，椭圆和矩形等几何信息；
- 5) 投射系统能够适应振频 2fps 以下，振幅 0.2mm 以上的振动环境，补偿精度优于 0.7Pixel；
- 6) 同时支持二维和三维工件的准确投射；
- 7) 技术成熟度从 TRL4 级提升到 TRL6 级。

主要研究内容：

(1) 拟解决的关键技术

1) Catia 原生模型文件总加工信息的解析

研究 Catia 设计模型中加工信息的存储结构并提取其中的孔位置 and 方向信息。

2) 模型文字几何信息镶嵌技术

解决在数模上镶嵌文字，直线，圆，椭圆和矩形等几何信息的问题，并将编辑后的模型文件进行格式化的分层存储。

3) 投影仪相机几何关系标定技术

由投影仪投射和相机成像几何关系建立投影仪与相机的标定模

型，通过最小二乘优化技术实现投影仪与相机几何参数的求解。

#### 4) 投影仪定位技术

通过识别定位相机拍摄工件上的特征孔的坐标以及模型上基准点的坐标自适应的选择 2D-2D 或者 2D-3D 的透视变换模型求解相机相对工件设计坐标的位置与姿态，并由此计算投影仪的位姿。

#### (2) 研究结果的验证方式

在大客装配厂房，采用研制的白光投射系统及装置在隔音棉上投射加工信息完成现场功能测试，并与隔音棉传统样板进行对比验证。

#### 预期成果：

- (1) 开发一套白光投射系统软件；
- (2) 研制一套白光投影系统样机；
- (3) 基于白光投射技术辅助隔音棉加工的研究报告 1 份；
- (4) 白光投射设备功能性能测试验证报告 1 份；
- (5) 申请发明专利 1 项。