

# 飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用

任少飞 柴佳雄 聂 豪 尚耀龙

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**摘 要：**飞机柔性装配方法结合了先进的数字化、自动化和智能化技术，实现了对不同型号飞机的快速适应性装配。该方法利用柔性材料和机器人技术，提高了装配的灵活性和精确性，显著缩短了装配周期，降低了生产成本。同时，飞机柔性装配方法还保证了飞机的制造质量，提升了装配效率。随着技术的不断进步，该方法的应用范围将进一步扩大，为飞机制造业带来更多机遇和挑战。

**关键词：**飞机柔性装配方法；飞机装配；应用

**引言：**飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用是航空制造领域的一次重大革新。随着航空工业的快速发展，对飞机制造精度、效率和灵活性的要求日益提高。柔性装配方法凭借其高度的模块化、数字化和自动化特点，成为解决传统刚性装配方法局限性的有效途径。该方法不仅能够显著提升装配精度和生产效率，还能灵活适应不同机型和部件的装配需求，为飞机制造带来前所未有的灵活性和竞争力。

## 1 飞机柔性装配方法的定义与原理

### 1.1 柔性装配方法的定义

飞机柔性装配方法是一种基于现代制造技术的先进装配模式，其核心在于通过柔性材料、可重构工装、智能机器人及数字化控制技术，实现飞机部件的高精度、高效率装配。与传统刚性装配相比，柔性装配具有以下特征：（1）灵活性。通过模块化设计（如可调夹具、数控支撑系统）快速适应不同机型、不同尺寸部件的装配需求，例如空客A320与A350可在同一生产线切换。

（2）精确性。依托激光跟踪仪、视觉传感器等实时反馈系统，装配精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，显著降低人工调整误差。

（3）自动化集成。融合工业机器人、AGV（自动导引车）等设备，实现钻孔、铆接、检测等工序的无人化或半无人化作业。

### 1.2 柔性装配方法的原理

#### 1.2.1 基于数字化测量和数控多点支撑系统

（1）数字化测量技术：采用激光跟踪仪（如Leica AT960）、iGPS（室内全球定位系统）等设备，实时采集部件位置数据，形成闭环控制。例如波音787机身对接中，iGPS系统可实现40m范围内 $\pm 0.1\text{mm}$ 的定位精度。光学扫描与摄影测量技术用于快速获取部件三维形貌，支持动态偏差补偿<sup>[1]</sup>。（2）数控多点支撑系统（NC Flexible Tooling）：通过伺服电机驱动滚珠丝杠，控制支

撑点的多自由度运动（XYZ三轴），适应部件因重力或温度引起的形变。例如空客A350机翼装配中，支撑系统可自动调整以抵消机翼挠曲变形。模块化支点设计允许快速切换工装，满足多型号混线生产需求。

#### 1.2.2 融合自动化和电子工程技术

（1）智能机器人技术：协作机器人（Cobot）结合力控传感器，实现高精度钻孔与铆接。例如空客A350装配线中，机器人可自动调整铆接力以避免复合材料损伤。机器视觉系统（如AI缺陷检测）用于实时质量监控，降低漏检率至0.01%以下。（2）数据驱动决策：基于PLM（产品生命周期管理）和MES（制造执行系统）集成装配数据，通过数字孪生模拟优化工艺参数。例如空客利用3DEXPERIENCE平台预演A350总装流程，减少20%的调试时间。IoT传感器实时监控装配状态，动态调整策略（如温度变化时的公差补偿）。

## 2 飞机柔性装配方法的关键技术

### 2.1 智能化装配设备

智能化装配设备是柔性装配的基础，其核心在于配备智能化的装配元件（如机器人、自动钻铆机、智能夹具等），以完成高精度、高复杂度的装配任务。（1）自适应控制：装配设备通过力/力矩传感器和视觉系统实时调整装配参数，例如自动钻铆机可根据材料硬度调整进给速度，避免损伤复合材料。（2）多任务协同：工业机器人可与AGV（自动导引车）协同作业，实现机身段、机翼等大型部件的自动化搬运与定位。（3）模块化设计：设备支持快速换型，例如空客A320和A350的混线生产可通过更换末端执行器（EOAT）适应不同机型需求。

### 2.2 数字化测量技术

数字化测量技术为柔性装配提供高精度定位与检测支持，确保装配过程的可控性，主要包含以下技术：

（1）先进的激光跟踪和内部全球定位系统。激光跟踪仪

(如Leica AT960)可实现 $\mu\text{m}$ 级测量精度,实时反馈部件位置偏差,指导机器人或数控支撑系统调整;iGPS(室内全球定位系统):通过多基站发射红外信号,构建大范围测量网络(如波音787机身对接中覆盖 $40\text{m}\times 20\text{m}$ 区域),定位精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ 。(2)高度灵活、可扩展的测量框架。采用分布式传感器网络,例如光学扫描仪与摄影测量结合,快速获取部件三维形貌,支持动态装配补偿<sup>[2]</sup>。

### 2.3 数控多点支撑系统

数控多点支撑系统(NC Flexible Tooling)是大型部件装配的核心装备,通过可编程控制实现高自由度调整,关键技术包括:(1)电机驱动的滚珠丝杠实现运动规律。伺服电机驱动支点沿XYZ三轴运动,定位精度达 $\pm 0.05\text{mm}$ ,例如空客A350机翼装配中,支撑系统可自动适应机翼挠曲变形。(2)卡板定位支点的纵向和横向运动。支点布局采用模块化设计,支持不同机型卡板的快速切换,例如波音787的碳纤维机身段装配中,支撑点间距可根据部件尺寸动态调整。

### 2.4 数据管理系统

数据管理系统是柔性装配的“大脑”,实现装配全流程的数字化管控,核心功能包括:(1)支持大量数据的管理和分析。基于PLM(产品生命周期管理)系统集成设计(CAD)、工艺(CAPP)和测量数据,例如空客使用达索系统3DEXPERIENCE平台管理A350的10万+装配工序数据。(2)实时监控装配过程,及时调整装配策略。通过数字孪生技术模拟装配流程,预测潜在冲突(如公差累积);实际装配中利用IoT传感器采集数据,动态优化工艺参数。

## 3 飞机柔性装配方法在飞机装配中的具体应用

### 3.1 大型飞机组件的柔性装配

#### 3.1.1 减少装配时间,提高精度和一致性

减少装配时间并提高精度和一致性是柔性装配技术最显著的优势。传统飞机装配依赖大量专用型架和固定工装,不仅准备周期长,且对不同型号组件的适应性差。而柔性装配系统通过数字化测量与定位技术,配合可编程控制的多自由度调整机构,能够实现机翼、机身等大型组件的高效精准对接。以现代数字化装配线为例,采用激光跟踪仪和全站仪组成的测量网络,配合伺服驱动的定位器,可将装配精度控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 范围内,较传统方法提高50%以上。同时,柔性工装的快速重构特性使得同一套系统能够适应不同机型或不同批次的组件装配需求,显著提高了设备利用率。

#### 3.1.2 降低出错率,提高生产效率

柔性装配系统在降低出错率并提高生产效率方面表现同样突出。传统装配过程中,人为因素导致的错装、漏装等问题约占质量缺陷的30%。柔性装配系统通过集成MBD(Model Based Definition)技术,将三维模型、工艺要求和检验标准直接传递至装配工位,操作人员通过AR眼镜或智能终端即可获取实时装配指引,大幅降低了人为失误的可能性。波音公司的统计数据显示,采用柔性装配系统后,其787梦想客机的装配错误率下降了68%,平均单机装配工时减少了约1200小时。这种效率提升不仅体现在直接工时的节约上,更反映在质量问题减少带来的返工时间降低和交付周期缩短<sup>[3]</sup>。

### 3.2 总装柔性对接技术

#### 3.2.1 构建专门的对接平台,实现高精度装配

构建高精度专用对接平台是柔性对接技术的物质基础。现代飞机总装对接平台集成了机械、电子、光学、液压等多领域技术,形成了一套完整的数字化装配生态系统。以空客A350XWB的总装线为例,其对接平台配备了32个数控定位器,每个定位器均具有六自由度调节能力,通过工业以太网实现同步控制,定位精度达到5微米级别。平台采用模块化设计,通过更换适配器可满足不同机型的总装需求,转换时间不超过8小时,而传统专用型架的更换则需要数周时间。这种平台还集成了自动激光测量系统,能够实时监控部件姿态,并与数字样机进行比对,指导定位器进行微调,确保对接过程中的相对位置误差不超过设计容差。

#### 3.2.2 提高自动化水平和适应性,提升装配质量

提升自动化水平和适应性是柔性对接技术的核心价值所在。现代柔性对接系统已从单纯的定位设备发展为具有决策能力的智能装配中心。波音787的总装车间采用了“智能轨道”系统,装配机器人可沿三维轨道自由移动,通过视觉识别系统自动获取部件特征,并基于点云数据生成最优装配路径。系统配备的力-位混合控制末端执行器能够感知接触力,在螺栓连接过程中自动补偿结构变形,确保预紧力均匀分布。这种高度自动化的对接方式使787机身段对接时间缩短至传统方法的1/3,同时将对接应力降低了40%,显著提高了结构疲劳寿命<sup>[4]</sup>。

### 3.3 典型应用案例

#### 3.3.1 Airbus A350XWB飞机装配线

Airbus A350XWB的柔性装配系统代表了欧洲航空制造的顶尖水平。A350XWB项目创新性地采用了“脉冲生产线”概念,将传统连续移动的装配线改进为间歇式推进系统,每个工位停留时间可根据工艺需求灵活调整。机身段装配采用全自动柔性工装系统,由87台数控定位器

组成,能够适应14种不同直径的机身段装配需求。工装系统与激光测量网络实时联动,每20秒完成一次全机扫描,确保装配过程中机身变形的精确控制。A350XWB的机翼装配则应用了"零应力"装配理念,通过236个压力传感器监测装配接触力分布,动态调整装配姿态,使机翼结构在无强制变形状态下完成对接,大幅提升了疲劳性能。空客的统计数据显示,这套柔性装配系统使A350XWB的总装周期缩短了35%,工装成本降低了28%,同时将装配精度提高了60%。

### 3.3.2 Boeing Dreamliner 787飞机装配

Boeing 787 Dreamliner的全球供应链装配模式彻底改变了传统飞机制造理念。787项目采用"模块化"装配策略,全球各地生产的大型部件通过波音开发的"超级对接"系统在总装厂完成最终装配。该系统的核心是重达800吨的柔性定位平台,配备52个液压支撑点,每个支撑点均具有独立控制和实时反馈能力。平台采用"浮动基准"技术,能够自动补偿部件因运输和存储产生的微小变形,实现全球分散制造部件的高精度对接。787的机翼-机身对接过程完全自动化,12台协作机器人同步作业,在GPS级精度的室内定位系统引导下,20分钟内即可完成传统方法需要8小时的对接工作。波音通过这套系统实现了87%的对接工序自动化,将人为干预降至最低,使787的装配质量一致性达到历史最高水平。

### 3.3.3 Embraer E190-E2飞机装配线

Embraer E190-E2的智能装配线展示了中小型飞机制造商的柔性装配创新。巴航工业在该项目上采用了"数字主线"(Digital Thread)技术,将设计、工艺规划和生产执行无缝连接。装配线上布置了超过1500个物联网传感器,实时采集装配过程中的扭矩、温度、振动等参数,并与

数字孪生模型比对,实现装配质量的在线预测和调控。E190-E2的机翼装配采用"逆向定位"柔性工装,先通过激光扫描获取实际部件形态,再计算最优装配路径,而不是强制部件适应理论工装位置,这种方法特别适合高复杂度曲面结构的装配。巴航工业还开发了独特的"移动装配单元",将柔性工装集成到自动导引车(AGV)上,实现了装配线的动态重构,可根据生产节拍需求灵活调整工位布局。统计表明,E190-E2的柔性装配系统使其装配效率提升了40%,生产面积需求减少了25%,同时实现了高达99.7%的装配质量合格率。

### 结束语

飞机柔性装配方法的应用,标志着航空制造业向更智能、更高效的方向迈进。通过数字化、自动化和智能化的手段,飞机柔性装配不仅大幅提升了装配精度和生产效率,还显著增强了生产线的柔性和适应性。随着技术的不断进步,飞机柔性装配方法将进一步完善,为实现飞机制造的精益化、智能化和全球化提供更加坚实的支撑。未来,飞机柔性装配方法的应用前景广阔,必将推动航空制造业迈向更高的发展阶段。

### 参考文献

- [1]陈丽婷.飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用研究[J].机械与电子控制工程,2024,(08):70-71.
- [2]于辉,洪涛.大飞机部件柔性装配数字化调姿技术研究[J].黑龙江科技信息,2021,(15):179-180.
- [3]屈伟强.飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用研究[J].工程研究与实用,2024,(16):202-203.
- [4]谢保红,张哲,薛金朋.飞机柔性装配方法在飞机装配中的应用[J].现代工程项目管理,2023,(08):95-96.