

# 柔性装配技术在飞机装配中的应用研究

曾涛 徐洁 陈久亮

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

**摘要:** 柔性装配技术凭借柔性工装、自动化设备、数字化系统等核心要素,满足飞机装配复杂需求。该技术能应对不同类型飞机装配差异,解决传统装配局限,实现工艺优化。但应用中面临技术、管理、人员层面问题,可通过加大研发、重构管理、加强合作、制定标准等策略解决,提升飞机装配效率与质量。

**关键词:** 柔性装配技术;飞机装配;自动化设备;数字化测量;工艺规划

引言:飞机装配对精度、质量要求严苛,传统装配技术难以适应产品多样化与个性化需求。柔性装配技术以模块化、自动化、数字化为特点,能快速调整适配不同装配场景,在提升装配精度、效率与质量稳定性方面优势显著。研究其在飞机装配中的应用,对提高飞机制造水平、增强企业竞争力意义重大。

## 1 柔性装配技术核心要素

### 1.1 柔性工装系统

柔性工装系统由基座、定位夹紧装置和可调节模块构成。基座作为基础承载结构,为整个系统提供稳定支撑,确保装配过程中不会因受力产生形变;定位夹紧装置负责对零部件进行精准固定,避免装配操作时出现位移;可调节模块则是实现柔性的关键,能够根据零部件特征进行形态调整<sup>[1]</sup>。三者协同形成完整支撑体系,基座承载重量,定位夹紧装置保障位置稳定,可调节模块适配不同装配需求。柔性工装系统通过机械结构的模块化组合、液压装置的平稳驱动力以及电动执行器的精确控制,实现快速调整与精确定位。机械结构便于拆卸重组,液压系统提供均匀夹持力,电动装置则通过伺服控制提升定位精度,共同满足不同形状和尺寸飞机零部件的装配要求。在装配精度保障方面,系统通过高精度传感器实时反馈位置信息,结合刚性结构设计减少变形误差;稳定的夹持力与定位基准确保装配过程中零部件位置恒定,多次装配时可复现相同装配状态,显著提升装配稳定性和重复性。

### 1.2 自动化装配设备

飞机装配中常用多关节机器人和直角坐标机器人。多关节机器人拥有6-8个旋转关节,运动轨迹灵活,适合复杂曲面的装配操作;直角坐标机器人沿固定坐标轴运动,定位精度高,适用于直线型装配工序。两种机器人根据装配场景形成互补应用。机器人在钻孔、铆接等操作中,通过预设程序结合视觉引导技术,实现毫米级

定位精度。钻孔时通过力矩反馈控制钻孔深度,铆接过程中精准控制压力与行程,涂胶操作则保证胶层厚度均匀,在搬运作业中平稳传递零部件,大幅提升装配效率与质量稳定性。输送带通过匀速传动实现零部件的连续转运,AGV小车凭借自主导航技术完成灵活搬运。2-3条输送带与4-6辆AGV小车通过物联网技术与装配设备实现数据互通,装配设备发出需求信号后,输送系统及时将零部件送至指定位置,形成协同作业流程。

### 1.3 数字化测量与监控系统

激光跟踪仪通过激光束追踪目标反射器,实现30-50米范围内0.01毫米级测量精度;三坐标测量机通过探针接触零部件表面,采集三维坐标数据,完成复杂轮廓的精确测量。两者广泛应用于零部件尺寸校验和装配位置校准,为装配精度提供数据支撑。视觉检测系统利用高清相机实时采集装配图像,通过图像处理算法比对标准模型与实际装配状态,快速识别装配偏差。发现零部件错位、连接不紧密等问题时,立即发出预警信号,为及时调整提供依据。数字化测量与监控系统通过工业以太网将测量数据实时传输至柔性工装和自动化设备的控制系统。工装系统根据测量数据调整定位参数,装配设备依据监控结果优化操作流程,形成“测量-反馈-调整”的闭环控制体系。

### 1.4 柔性装配技术的特点与优势

面对飞机产品更新换代快、生产批量波动大的问题,柔性装配技术可通过调整程序参数、更换模块化工装实现快速转型,无需大规模改造生产线路,有效提升生产适应性。以某企业为例,采用柔性装配技术后,面对新型号飞机,生产转型时间从原来的3-6个月缩短至1-2个月。自动化设备减少人工操作干预,数字化系统实现全程数据追溯,避免人为操作带来的随机误差,确保不同批次产品的装配质量保持一致<sup>[2]</sup>。流程优化与自动化作业缩短装配周期,以某大型客机为例,装配周期从原来

的18-24个月缩短至12-15个月，模块化设计降低设备改造成本，数据化管理减少物料浪费，这些优势共同提升飞机制造的经济效益，增强企业市场竞争力。

## 2 飞机装配的特点与需求分析

### 2.1 飞机装配的复杂性与特殊性

飞机结构的复杂性体现在海量零部件的多元特性上。一架大型客机仅铆钉就可达两百多万颗，零部件种类涵盖金属构件、复合材料部件、电子元件等，形状从简单平面延伸至复杂曲面，尺寸跨度从毫米级到数十米级。连接方式包括铆接、胶接、螺栓紧固等，装配关系呈现立体交织状态，前序部件的安装精度直接决定后续工序的可行性。飞机装配对精度质量的要求严苛至极。机身蒙皮装配间隙需控制在0.5毫米以内，铆钉孔直径公差精确到0.01毫米，连接强度需承受每平方米数吨的剪切力。这种要求源于飞行中复杂的载荷变化，机身需耐受膨胀收缩与高频震动，装配质量直接关乎飞行安全。装配过程融合机械设计、材料科学、电子技术等多学科知识，机械设计奠定结构基础，材料科学指导不同材质的连接工艺，电子技术支撑自动化设备运行，对装配技术的集成度和人员的综合素养提出极高标准。

### 2.2 不同类型飞机装配的差异化需求

民用飞机装配规模大，要融入舒适配置，经济可靠是核心，装配工艺需兼顾标准化与规模化生产以控制成本，同时需满足数百架乃至上千架的量产需求以适配民航市场。而其他类型飞机，如为保障隐身性能的特种机型，埋头铆钉与蒙皮高差需小于0.1毫米，生产多为数十架小批量定制模式，每一架都需根据实际应用需求进行细节调整。具体机型需求各有侧重。大型客机机身分段多，装配依赖高精度自动化对接设备，质量控制需覆盖全流程追溯，从零部件加工到整机总成都要建立完整数据档案。小型支线飞机结构相对简化，装配更追求流程灵活度，通过模块化设计降低调整成本。战斗机装配聚焦发动机与机身的连接精度，保障高机动性，同时需强化机身抗过载能力以适配高难度飞行动作。运输机则强化承重结构的装配强度，需通过极限载荷测试验证可靠性。

### 2.3 传统飞机装配技术面临的挑战

传统装配技术在应对飞机产品多样化、个性化需求时尽显局限。多数传统工装为专用设计，针对特定机型定制，面对新型号零部件时，需重新设计制造工装，调整装配工艺耗时长达数月，难以适应快速迭代的市场需求。传统装配技术以人工操作为核心，钻孔、铆接等关键工序依赖操作人员经验，容易因手部力度变化、视觉

判断偏差产生误差，导致同批次产品质量一致性较差。人工操作效率低下，单架飞机装配周期常超过一年，无法满足批量生产需求。传统装配技术在成本控制与资源利用方面存在明显不足。专用工装设备制造成本高昂，且无法跨机型复用，造成设备资源闲置浪费。人工操作过程中产生的零部件报废率较高，材料损耗增加生产成本<sup>[3]</sup>。这些问题导致传统装配模式难以适应现代飞机制造对效率、成本、质量的综合要求，技术升级需求迫切。

## 3 柔性装配技术在飞机装配中的具体应用

### 3.1 柔性工装在飞机部件装配中的应用

柔性工装依托模块化设计理念，将工装拆解为多个标准模块，搭配可调节机械结构，能根据不同飞机部件的形状和尺寸快速完成调整与定位。面对机身蒙皮、翼梁等差异显著的部件，仅需更换2-3个对应功能模块，通过电动驱动调节模块间距与角度，即可实现工装的快速重构，无需重新设计整体结构。柔性工装备高精度定位销、光栅尺等元件，配合稳定的液压夹紧装置，能将部件牢固固定在预设位置，减少装配过程中因外力作用产生的变形和振动，确保部件对接面贴合紧密。这种设计大幅缩短工装更换时间，原本需要3-5天的工装调整工作可压缩至6-12小时，支持多品种部件在同一生产线上连续装配，显著提升装配效率。

### 3.2 自动化装配设备在飞机总装中的应用

飞机总装中，机器人承担明确任务分配。多关节机器人负责机身对接、机翼与机身连接等关键部位的钻孔、铆接操作，直角坐标机器人则专注内饰安装、设备调试等辅助工作，通过预设程序精准完成每一个动作。AGV小车、智能输送带等自动化输送装置，凭借激光导航、视觉定位系统，能将发动机、尾翼等重型部件精准转运至装配工位，误差控制在毫米以内，保障对接过程的准确性。自动化装配设备与柔性工装系统通过工业以太网实现数据交互，工装调整参数实时传递至机器人控制系统，机器人运行状态反馈至工装调节模块，通过信号联动控制实现装配过程的自动化衔接，提升整体智能化水平。

### 3.3 数字化测量与监控系统在飞机装配全过程的应用

激光跟踪仪在装配现场实时追踪零部件空间位置，将测量数据与设计模型对比，若发现偏差立即反馈至控制系统，及时调整工装定位或装配路径。视觉检测系统通过高清相机连续采集装配画面，借助图像识别算法分析螺栓拧紧状态、铆接平整度等关键指标，一旦检测到缺陷便自动发出警报。数字化测量与监控系统与生产管理系统深度集成，测量数据、质量检测结果同步录入

生产数据库,实现装配进度实时监控、质量问题溯源追踪,为生产调度提供数据支撑,有效提高生产效率和产品质量。

### 3.4 柔性装配技术与飞机装配工艺规划的融合

基于柔性装配技术的工艺优化,会结合柔性工装的调整范围和自动化设备的运动特性,重新规划装配顺序,将复杂部件拆解为模块化单元分步装配,优化机器人运动路径以减少空程时间。柔性装配技术通过数字化系统精准控制钻孔转速、铆接压力等工艺参数,根据不同材质零部件的特性自动匹配最优参数并实时调整。这种融合模式缩短了工艺准备周期,降低工装重复投入成本,通过参数精准控制和过程监控,进一步保证装配质量,实现效率与成本的双重优化。

## 4 柔性装配技术在飞机装配应用中面临的问题与对策

### 4.1 技术层面的问题

柔性装配技术在高精度与高可靠性实现上存在明显瓶颈。柔性工装长期使用后易出现机械磨损,导致定位精度下降,尤其在复杂曲面部件装配中,误差累积难以控制<sup>[4]</sup>。自动化设备运动控制精度受环境振动影响显著,高速运行时易出现轨迹偏移。数字化系统与装配环境的兼容性问题突出,传感器在高温、粉尘环境下数据采集准确性降低,工业以太网传输海量测量数据时偶发延迟或中断,影响实时控制效果。复合材料零部件装配成为技术难题,其易变形特性增加定位难度,胶接工艺对温度湿度敏感,质量稳定性难以保障。

### 4.2 管理层面的问题

柔性装配技术引入后,传统生产管理模式难以适配。生产计划需随工装调整、设备参数优化动态变更,原有固定流程规划方式失效。柔性设备与传统工装并存导致生产流程衔接不畅,部分岗位人员配置冗余,资源浪费现象时有发生。供应链管理面临新挑战,柔性装配依赖多品种零部件快速切换,若供应商无法及时响应需求变化,易造成生产中断。零部件质量波动会直接影响自动化装配效果,给质量管控带来更大压力。

### 4.3 人员层面的问题

柔性装配技术对操作人员提出全面技能要求,不仅要熟练操作自动化设备,还需掌握数字化系统数据处

理、装配工艺参数调整等知识。当前多数装配人员长期依赖传统经验,数字化设备操作能力薄弱,对新装配工艺理解不足,创新思维欠缺,难以适应技术升级需求。人员培训需构建系统性体系,通过开设自动化控制、数字测量等专项课程夯实理论基础,搭建模拟装配平台强化实践操作,建立激励机制鼓励员工主动学习新技术。

### 4.4 应对策略与建议

针对各类问题需采取针对性措施。技术上加大研发投入,开发耐磨型定位元件与抗干扰运动控制系统,优化传感器防护结构与数据传输协议<sup>[5]</sup>。管理上重构生产管理体系,采用数字化调度系统实现计划动态调整,通过流程仿真优化资源配置,与供应商建立协同平台保障零部件供应。产学研合作可整合各方优势,高校提供理论支持,科研机构攻克技术难关,企业提供实践场景,形成技术研发与人才培养合力。同时加快制定柔性装配技术标准,规范设备选型、工艺实施与质量检测流程,推动技术在行业内有序发展。

### 结束语

柔性装配技术在飞机装配中的应用,有效提升了装配的精度、效率与适应性,解决了传统技术面临的诸多难题。尽管在技术、管理、人员等方面仍存在挑战,但通过加大研发投入、重构管理体系、加强人员培训等措施,可逐步克服困难。随着各项策略的实施,柔性装配技术将在飞机制造领域发挥更大作用,助力企业提升竞争力,推动行业持续发展。

### 参考文献

- [1]李城.柔性装配技术在飞机装配中的应用研究[J].中国高新科技,2025(1):131-133.
- [2]张显志.飞机部件装配数字化柔性工装技术探讨[J].模型世界,2025(11):139-141.
- [3]王力京,冯三龙,李成毅.飞机柔性装配工装关键技术分析[J].模型世界,2025(22):148-150.
- [4]孟浩,柳全磊,宋国秋.飞机柔性装配在飞机装配中的应用分析[J].数字化用户,2024(24):277-278.
- [5]周莹,魏柏林.机身部件柔性装配数字化测量技术应用研究[J].数字化用户,2024(45):11-12.