

智能制造技术在飞机部件数字化装配中的应用

王伟

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

摘要: 智能制造技术为飞机部件数字化装配带来革新。通过构建智能装备、数字化设计等四层架构,借助智能感知、自动化装配、数字孪生等关键技术,在机身装配流程优化、复合材料结构装配创新及智能物流与供应链协同方面成效显著。但也面临数据兼容、实时性等挑战。未来,其将朝着人工智能驱动自适应装配、增材制造与装配一体化方向发展,构建产业生态,需政策助力推动标准制定与产学研合作。

关键词: 智能制造技术;飞机部件数字化装配;应用

引言:在航空制造业高速发展的当下,飞机部件装配的质量与效率对整机性能和交付周期起着决定性作用。传统装配模式依赖大量人工,存在精度把控难、效率低、质量不稳定等弊端。而智能制造技术凭借其智能化、自动化、数字化的优势,成为破解装配难题的关键。它融合多种前沿科技,能实现精准作业、流程优化与智能决策。深入研究其在飞机部件数字化装配中的应用,对提升航空制造水平意义重大。

1 智能制造技术体系与核心要素

1.1 智能制造技术架构

(1) 构建智能装备、数字化设计、智能物流、智能决策四层架构模型。智能装备层以工业机器人、智能传感器为核心,实现生产作业自动化执行;数字化设计层依托CAD/CAM等软件搭建虚拟设计平台,完成产品全生命周期的数字化建模;智能物流层通过AGV小车、智能仓储系统实现物料精准配送与动态管理;智能决策层基于数据挖掘算法输出生产优化方案,形成“执行-设计-配送-决策”的闭环体系。(2) 解析信息物理系统(CPS)、物联网(IoT)、大数据、人工智能的协同作用机制。IoT设备采集生产现场实时数据,经CPS系统实现物理实体与虚拟模型的深度融合,大数据平台完成数据存储与预处理,人工智能算法对数据进行分析挖掘,输出设备维护预警、生产调度优化等决策指令,四类技术形成“数据采集-融合处理-分析决策”的协同链条。

1.2 关键技术要素

(1) 智能感知技术:激光扫描技术实现零部件轮廓的高精度识别,三维坐标测量机(CMM)精准获取装配基准数据,数字图像相关技术(DIC)动态捕捉装配变形量,三者协同提升复杂产品装配定位的精度与稳定性,误差控制在0.01mm以内。(2) 自动化装配技术:机器人制孔通过视觉定位系统实现高精度加工,电磁铆接技术

解决传统铆接效率低的痛点,自适应控制系统根据实时工况动态调整装配参数,形成柔性化装配解决方案,生产效率提升40%以上。(3) 数字孪生技术:通过构建与物理装配线1:1的虚拟模型,实时映射装配进度、设备状态等数据,利用仿真算法模拟不同工况下的装配过程,提前预判潜在问题,实现装配流程的动态优化。(4) 数据驱动决策:整合MES系统的生产执行数据与ERP系统的资源规划数据,搭建统一数据平台,通过机器学习算法实现质量缺陷实时监控与设备故障预测性维护,将产品不良率降低30%,设备停机时间缩短25%^[1]。

2 智能制造技术在飞机部件数字化装配中的应用

2.1 机身装配流程优化

(1) 自动化对接系统:引入高精度定位技术构建空间定位网络,实时捕捉大型机身部件的空间姿态数据,通过智能算法对部件位置偏差进行动态计算与调整,确保不同机身段在对接过程中达到微米级精度标准。该系统可自动完成部件的姿态校准、偏差补偿与对接固定,替代传统依赖人工调整的作业模式,大幅提升对接过程的稳定性与精准度,避免因人工操作误差导致的装配偏差问题。(2) 虚拟装配验证:借助专业装配仿真软件搭建机身虚拟装配环境,将机身各部件的三维模型、装配工艺参数及设备运动轨迹等数据导入仿真系统,对整个装配流程进行数字化模拟。通过仿真可提前排查装配路径中的干涉问题、工艺参数设置不合理等潜在风险,优化装配顺序与操作步骤。在虚拟环境中完成多轮验证与调整后,将优化后的工艺方案直接应用于实际装配,有效减少实际生产中的调试次数与停机时间,提升装配流程的顺畅性。(3) 智能工具管理:为机身装配所用工具配备智能识别标签,构建工具全生命周期管理系统。通过无线识别技术实时采集工具的使用状态、位置信息、维护记录等数据,并上传至管理平台。系统可对工具的

领用、归还、校准周期进行自动提醒,避免工具遗漏、错用或超期使用等情况。同时,当工具出现异常状态时,系统能及时发出预警,防止因工具问题导致的装配质量缺陷,减少因人为误操作引发的返工成本与时间损耗^[2]。

2.2 复合材料结构装配创新

(1) 轻量化材料加工:针对复合材料的物理特性与加工难点,采用非接触式高能加工技术与低损伤钻孔技术。非接触式加工技术通过高能束实现材料的精准切割与连接,避免传统机械加工对复合材料纤维结构的破坏;低损伤钻孔技术则通过特殊的刀具设计与工艺参数控制,减少钻孔过程中产生的毛刺、分层等缺陷,保障复合材料部件的结构完整性。这些技术的应用解决了复合材料在装配过程中加工难度大、易受损的问题,为轻量化材料在飞机部件中的广泛应用提供技术支撑。(2) 在线监测系统:在复合材料结构装配过程中,嵌入分布式应变传感元件,构建实时监测网络。传感元件可全程采集装配过程中材料层间的应力变化数据,将数据实时传输至数据分析平台。平台通过专业算法对数据进行处理与分析,判断材料是否存在应力集中、层间分离等风险。一旦监测到异常数据,系统立即发出预警信号,提示操作人员及时采取调整措施,从源头预防复合材料部件因装配应力导致的脱粘、开裂等缺陷,保障装配质量。

2.3 智能物流与供应链协同

(1) AGV自动导航:在飞机部件装配车间部署自动导引车,结合高精度空间定位技术构建车间定位网络。AGV通过接收定位系统传输的位置信息与任务指令,自主规划行驶路径,完成飞机部件、工装夹具等物料的搬运与配送。在运行过程中,AGV可实时避开障碍物,动态调整行驶速度,确保物料精准、高效送达指定装配工位。这种智能物流模式替代了传统人工搬运方式,减少了物料在运输过程中的等待时间与搬运误差,提升了车间物流运转效率,为装配流程的连续推进提供保障^[3]。

(2) 数字化供应链平台:搭建覆盖飞机部件原材料供应商、零部件生产商、装配企业等全链条的数字化平台,引入分布式数据管理技术。平台将供应链各环节的生产进度、库存数量、质量检测报告等数据进行整合与实时共享,确保各参与方能够及时获取准确的供应链信息。通过数字化技术对供应链数据进行追溯与管理,实现对物料采购、生产、运输等环节的全程监控,有效避免信息不对称导致的供应链延误问题。同时,平台可根据装配计划自动调整物料供应节奏,优化库存结构,缩短物料在供应链中的周转周期,降低供应链运营成本,提升整体供应链的协同效率与响应速度。

3 智能制造技术在飞机部件数字化装配中的实施路径与挑战

3.1 技术集成方案

(1) 硬件层:根据飞机部件装配精度需求,优先选型具备力控反馈功能的高精度机器人,搭配激光跟踪仪构建实时位置校准体系,同时部署多维度力控传感器监测装配力值变化。通过硬件间的协议适配,实现机器人运动轨迹、激光定位数据与力控参数的协同联动,确保硬件设备在装配作业中形成闭环控制,满足复杂部件装配的精度与稳定性要求。(2) 软件层:搭建CAD/CAM/CAE一体化平台,打通产品设计、加工编程与性能仿真的数据链路,实现设计模型向生产指令的直接转化。同步部署数字孪生建模工具,基于三维几何模型与物理属性参数,构建包含装配流程、设备状态的虚拟仿真环境,支持软件系统间的数据实时交互,为装配工艺优化提供数字化支撑。(3) 网络层:依托5G+工业互联网架构,搭建低延迟、高可靠的车间通信网络。通过网络切片技术为装配设备、传感器、软件系统划分专属通信通道,实现设备间毫秒级数据传输,保障实时控制指令、传感器数据的高效交互,避免网络延迟对装配精度与效率的影响。

3.2 关键挑战分析

(1) 数据兼容性:飞机部件装配涉及CAD模型、传感器实时数据、设备运行日志等多源异构数据,不同数据格式、采集频率差异大,缺乏统一标准导致数据难以有效整合,易形成“数据孤岛”,影响后续数据分析与决策效率。(2) 实时性要求:装配过程中机器人运动控制、偏差调整需毫秒级响应,而多设备并发数据处理、复杂算法运算会占用大量算力,导致控制系统响应延迟,难以满足高精度装配的实时性需求。(3) 人机协作安全:协作机器人与操作人员在同一作业空间交互时,若缺乏精准的安全监测与应急制动机制,可能因机器人运动轨迹偏差、人员误操作引发碰撞风险,威胁人员安全。(4) 成本与效益平衡:智能制造技术实施需投入大量硬件采购、软件开发与系统集成成本,而飞机部件生产周期长、型号迭代慢,导致初期投资回收周期长,ROI计算难度大,难以快速实现经济效益转化。

3.3 应对策略建议

(1) 制定统一数据交换标准,推广STEPAP242格式应用,规范CAD模型、装配工艺数据、传感器数据的格式与接口,实现多源数据的无缝集成与共享,打破“数据孤岛”。(2) 采用边缘计算技术,将数据处理、算法运算下沉至车间边缘节点,减少数据传输至云端的延

迟,提升控制系统响应速度,满足装配实时性需求。

(3)通过虚拟现实(VR)培训,模拟人机协作装配场景,让操作人员熟悉协作机器人运动规律与安全操作规范,提升安全操作技能,降低人机交互风险。(4)构建模块化生产线,采用标准化接口与可重构设备,实现不同型号飞机部件的快速切换生产,提高生产线柔性利用率,缩短投资回收周期,提升经济效益^[4]。

4 智能制造技术在飞机部件数字化装配领域的未来发展趋势与展望

4.1 技术融合方向

(1)人工智能驱动的自适应装配:将深度学习算法深度融入装配控制系统,通过持续学习历史装配数据、实时工况参数,自主优化机器人运动轨迹、力控阈值等关键装配参数。面对不同批次部件的尺寸偏差或材料特性波动,系统可动态调整操作策略,无需人工干预即可实现高精度装配,大幅提升装配过程的柔性及容错能力,突破传统固定工艺参数对装配质量的限制。(2)增材制造与数字化装配一体化:推动3D打印技术与数字化装配流程深度协同,在增材制造环节直接生成带精准装配接口的飞机部件,省去了传统加工中接口打磨、校准等工序。通过数字孪生技术提前规划打印参数与装配路径,实现“打印即适配”,缩短部件从生产到装配的周期,同时减少因接口不匹配导致的返工,提升整体生产效率与资源利用率。

4.2 产业生态构建

(1)跨企业协同平台:搭建覆盖飞机制造全产业链的数字化协同平台,打通供应商、制造商、客户之间的数据壁垒,实现原材料采购、部件生产、装配进度、质量检测等数据的全流程贯通。供应商可实时获取制造商的物料需求与质量标准,制造商能同步客户的定制化需求并快速响应,客户则可实时追踪产品生产进度,形成高效协同的产业生态,降低全链条沟通成本与信息滞后风险。(2)绿色制造:借助数字仿真技术对飞机部件装配流程进行全周期模拟,优化物料投放量与工艺路径,减少原材料浪费与能源消耗。通过数字孪生对装配设备

进行能耗监测与优化,降低设备空载运行能耗;同时利用仿真提前排查装配缺陷,避免因返工导致的额外碳排放,推动飞机制造产业向低碳、环保方向转型。

4.3 政策与标准建议

(1)推动行业级数字装配标准制定:联合行业协会、龙头企业制定统一的飞机部件数字装配标准,明确装配精度分级规范、数据采集与传输要求、设备接口协议等内容,解决不同企业间技术标准不统一导致的协同壁垒,为行业技术推广与规模化应用奠定基础,提升整个行业的数字化装配水平。(2)加强产学研合作,突破关键共性技术:通过政策引导推动高校、科研机构与制造企业建立深度合作机制,聚焦复合材料连接工艺、高精度传感检测等飞机部件装配领域的关键共性技术,整合科研资源开展联合攻关,加速技术成果转化与产业化应用,打破国外技术垄断,提升我国飞机制造产业的核心竞争力。

结束语

智能制造技术于飞机部件数字化装配而言,是推动行业升级的关键力量。其在优化装配流程、创新装配方式、提升物流协同等方面成果斐然,有力提高了装配精度与效率、保障了质量。不过,实施中面临的数据兼容、实时响应等挑战不容忽视。展望未来,随着技术融合深入、产业生态完善以及政策标准支持,智能制造技术将进一步赋能飞机部件装配,助力我国航空制造业在全球竞争中脱颖而出,实现从“制造”到“智造”的跨越。

参考文献

- [1]王新民,胡铮.智能制造体系在飞机装配中的应用[J].集成电路应用,2022,(09):116-117.
- [2]刘宝剑.数字化测量技术在飞机装配中的应用[J].科技创新导报,2022,(08):66-67.
- [3]成鸿.数字化装配技术及工艺装备在大型飞机研制中的应用[J].航空制造技术,2022,(12):110-112.
- [4]王喜.大型飞机数字化装配在线测量技术研究[J].航空制造技术,2022,(07):88-89.