

# 航空领域智能机械制造工艺的创新路径研究

王新建<sup>1</sup> 刘 明<sup>2</sup>

1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710000

2. 海军装备部 陕西 西安 710000

**摘要：**随着航空产业的高速发展，传统制造工艺已难以满足高精度、高效率的生产需求。本文聚焦航空领域智能机械制造工艺的创新路径，剖析当前航空制造工艺面临的技术瓶颈与管理难题。阐述数字化设计与仿真、自动化装配、智能检测及增材制造等关键技术在航空领域的应用现状。从技术创新、人才培养、产业协同三方面提出创新路径，旨在突破技术壁垒，提升航空制造智能化水平，推动我国航空产业高质量发展，为航空制造企业的转型升级提供理论依据与实践参考。

**关键词：**航空领域；智能机械；制造工艺；创新路径

引言：航空工业作为国家战略性新兴产业，其制造水平的高低直接影响国家综合实力。当下，航空产品朝着高性能、高可靠性方向发展，对制造工艺提出了更为严苛的要求。传统航空制造工艺存在效率低下、精度不足、柔性差等问题，严重制约了航空产业的进一步发展。在此背景下，智能机械制造工艺成为航空领域的关键突破口。深入研究航空领域智能机械制造工艺的创新路径，对于提升我国航空制造核心竞争力、实现航空强国目标具有重大现实意义。

## 1 航空领域智能机械制造工艺概述

航空领域智能机械制造工艺是融合信息技术、自动控制技术与先进制造技术的综合性生产体系。其核心在于以数据为纽带，贯穿产品设计、加工、装配及检测全流程，实现高效、精准、柔性的生产模式。该工艺依托数字化建模与虚拟仿真技术，可在设计阶段预判产品性能并优化工艺参数；通过工业机器人、自动化生产线及智能传感设备，完成高精度零部件加工与自适应装配；借助物联网与大数据平台，实时采集生产数据并进行动态分析，支撑工艺迭代与质量管控。相较于传统航空制造，智能工艺显著提升了复杂结构件（如整体框架、蒙皮壁板）的加工效率与精度，降低了人为操作误差风险。尤其在大型客机、军用战机等高端装备研制中，智能工艺通过模块化设计、柔性化生产和全生命周期管理，有效缩短研制周期，降低生产成本<sup>[1]</sup>。

## 2 当前航空制造工艺的现状及挑战

### 2.1 传统航空制造工艺的局限性

传统航空制造工艺以手工作业与半自动化设备为主，存在显著短板。其一，生产效率低下，大量依赖熟练技工完成钻孔、铆接等工序，劳动密集且周期长；其

二，精度控制不稳定，人为因素导致的装配偏差难以完全消除，影响飞行器性能与安全性；其三，柔性化能力弱，难以快速响应设计变更需求，尤其在小批量多品种的生产模式下，产线调整成本高昂；其四，资源浪费严重，金属材料切削量大，废料率高，不符合绿色制造趋势。

### 2.2 航空领域对智能机械制造工艺的新要求

航空工业对智能机械制造工艺提出更高标准。一是极致精度要求，关键承力部件需达到微米级形位公差，确保气动外形与结构强度；二是全流程数字化贯通，从设计端三维模型到制造端数控代码无缝衔接，实现虚实映射；三是自适应生产能力，能动态调整加工参数应对材料批次差异，保障产品质量一致性；四是智能化质量控制，通过机器视觉与在线检测实现缺陷自动识别与分类处理；五是绿色制造属性，要求减材优化设计与可持续材料应用相结合。这些需求推动着制造工艺向数字化、网络化、智能化方向深度演进。

### 2.3 面临的技术和管理挑战

技术层面面临多重难关：高端数控机床长期被国外垄断，自主可控性不足；复合材料构件加工工艺尚不成熟，易产生分层缺陷；多机器人协同作业的路径规划算法复杂度高，存在碰撞风险。管理方面同样棘手：现有生产模式由串行转为并行后，跨部门数据共享机制缺失；工人技能转型困难，复合型人才储备不足；供应链协同效率低下，零部件配套周期难以匹配智能生产节奏。更严峻的是，工业互联网平台建设滞后，设备数据采集协议不统一，形成诸多“信息孤岛”。唯有突破这些技术壁垒并重构管理体系，才能真正释放智能制造潜力<sup>[2]</sup>。

## 3 智能机械制造工艺在航空领域的应用

### 3.1 数字化设计与仿真技术

数字化设计与仿真技术是航空智能制造的核心驱动力。通过三维建模软件构建精确的数字孪生模型，可在虚拟环境中完成气动外形优化、结构强度校核及装配干涉检查，大幅压缩物理试验次数。基于有限元分析的仿真平台能模拟极端载荷下的应力分布，指导轻量化设计；流体动力学仿真则可预判飞行性能并优化翼型布局。该技术实现了设计-工艺-制造的数据贯通，使工艺规划提前介入设计阶段，有效规避后期返工风险。此外，数字化协同平台支持跨地域团队实时共享模型数据，缩短研制周期。该技术的应用显著提升了设计迭代效率，降低了试错成本，为复杂航空产品的快速研制提供了技术支撑。

### 3.2 自动化装配技术

自动化装配技术重构了航空制造的生产模式。高精度机器人集群配备力觉传感器与视觉引导系统，可自主完成钻孔、制孔、铆接等精密操作，将装配精度控制在微米级。智能工装夹具集成形状记忆合金，能根据工件变形自动调整装夹力度，避免零件损伤。自动化装配线采用模块化架构，可快速重组以适应不同机型的生产需求。关键工序引入增强现实（AR）辅助系统，操作人员佩戴智能眼镜即可获取三维装配指引，降低人为失误率。物流环节由自动导引车（AGV）实现物料精准配送，与生产节拍同步。该技术使装配效率提升数倍，且质量稳定性远超人工操作。特别是在大型机身段对接中，自动化测量系统实时校准位姿，确保对接间隙均匀，为后续密封作业奠定基础。

### 3.3 智能检测技术

智能检测技术构建了航空制造的质量防线。机器视觉系统搭载高分辨率相机与深度学习算法，可对复合材料铺层、焊缝成形等关键特征进行亚毫米级缺陷识别。超声波相控阵检测设备通过多角度扫描，精准定位内部裂纹并量化其尺寸。X射线断层扫描（CT）技术实现复杂构件的内部结构可视化，用于验证蜂窝夹层结构的胶接质量。在线检测系统嵌入生产线，实时采集加工数据并与设计模型比对，发现超差立即报警停机。人工智能诊断平台积累海量检测数据后，能主动识别异常模式并预测潜在缺陷区域。该技术使检测效率提升80%以上，漏检率降至万分之一以下。对于航空发动机叶片这类高精度部件，智能检测系统还能建立质量追溯档案，为全生命周期管理提供数据支撑。

### 3.4 增材制造技术

增材制造技术正在颠覆航空零部件的传统生产方式。激光选区熔化（SLM）和电子束熔融（EBM）技术

可直接成形钛合金、高温合金等难加工材料的复杂结构件，如燃油喷嘴、热交换器等。拓扑优化算法生成晶格结构，在保证强度的前提下实现减重目标。该技术突破了传统铸造对结构复杂度的限制，可将多个零件整合为整体式构件，减少装配环节。在维修领域，现场增材修复技术可快速恢复受损涡轮叶片的几何尺寸。多材料复合打印技术正在探索异种金属梯度过渡层的制备，解决界面结合强度难题。尽管当前存在表面粗糙度控制、内部缺陷消除等挑战，但该技术已成功应用于F-35战机散热管道、C919飞机舱体支架等关键部件<sup>[3]</sup>。

## 4 航空领域智能制造工艺的创新路径

### 4.1 技术创新方面

#### 4.1.1 加大对关键核心技术的研发投入

聚焦航空智能制造“卡脖子”环节，集中攻关高精度数控机床、智能传感装置、工业软件等核心领域。设立专项基金支持五轴联动加工中心、激光焊接设备等装备国产化替代，打破国外技术封锁。建立产学研联合实验室，针对航空专用复合材料加工、微小孔径精密钻削等难点开展基础研究。通过税收优惠激励企业加大研发投入，形成“需求牵引+技术突破”的良性循环。

#### 4.1.2 推动多学科融合发展

构建机械工程、计算机科学、材料学、控制论等多学科交叉创新平台。运用人工智能算法优化加工工艺参数，结合材料基因组学开发新型航空合金的成型规律。将生物仿生学理念融入结构设计，借鉴鸟类骨骼特征改进承力构件拓扑结构。建立数字孪生驱动的研发模式，实现物理样机与虚拟模型的实时交互验证。

#### 4.1.3 加强对新技术的探索和应用

前瞻布局数字孪生、区块链、量子计算等颠覆性技术在航空制造的场景化应用。搭建开放式创新实验平台，开展3D打印梯度材料构件、机器人集群协同装配等前沿技术验证。建立快速试错机制，允许在非关键件生产中先行先试新工艺。构建技术成熟度评价体系，分阶段推进增材制造主承力构件、自适应加工系统等创新成果产业化。

### 4.2 人才培养方面

#### 4.2.1 优化高校相关专业设置

高校需重构航空智能制造相关专业的课程体系，增设数字化设计、智能传感、工业机器人等核心课程，强化学生编程与数据处理能力。推动“新工科”建设，开设交叉学科模块，融合机械工程、计算机科学与材料学知识。联合航空企业共建实训基地，引入真实生产案例进行项目化教学。建立校企双导师制，邀请工程师参与实践

指导，使人才培养与产业需求精准对接。通过虚拟仿真实验室模拟智能制造场景，培养学生解决复杂工程问题的能力，为行业输送具备数字化思维的高素质人才。

#### 4.2.2 开展企业内部培训和继续教育

航空制造企业应构建分层分类的培训体系，针对一线技工开展数控机床操作、智能设备维护等实操培训；对技术人员重点强化数字孪生、工艺仿真等数字化工具应用能力。建立常态化学习机制，通过“微课堂”“技能擂台赛”等形式激发员工学习动力。依托工业互联网平台开发在线课程库，实现碎片化学习与经验共享。实施“师徒制”传承计划，由资深技师指导青年员工掌握精密装配等关键技艺。定期组织赴先进企业交流学习，拓宽技术视野，加速知识迭代更新。

#### 4.2.3 引进高端人才

制定具有国际竞争力的人才引进政策，面向全球招揽智能制造领域的领军人物和青年英才。设立首席科学家岗位，赋予技术路线决策权，配套充足的科研经费和团队组建自主权。打造高水平研发平台，提供尖端实验设备和数据资源支持。采用“揭榜挂帅”机制，围绕复合材料智能成型、自适应加工等难题开展专项攻关。完善股权激励制度，将创新成果与个人收益深度绑定。通过柔性引才方式，聘请海外专家担任技术顾问，形成“不为所有、但求所用”的人才生态。

### 4.3 产业协同方面

#### 4.3.1 建立航空制造产业联盟

由政府主导搭建航空制造产业联盟，汇聚主机厂所、配套供应商、科研机构及高校等多元主体。联盟需制定统一的技术标准与接口规范，打破“信息孤岛”，实现设计数据、工艺参数、质量要求的互联互通。通过共建共享试验验证平台、中试基地等基础设施，降低中小企业技术准入门槛。重点围绕复合材料加工、智能装配等共性技术开展联合攻关，形成专利池并开放授权。定期发布《技术白皮书》指引行业发展方向，推动产业链上下游协同创新。联盟还可设立专项基金扶持创新型中小企业，培育专精特新“隐形冠军”，构建自主可控、安全高效的航空制造产业生态。

#### 4.3.2 加强供应链协同管理

构建航空制造供应链数字化协同平台，打通需求预测、生产计划、物流配送等环节的数据壁垒。采用区块链技术实现物料溯源与质量档案的可信存证，提升供应链透明度。推行供应商早期介入（EPI）模式，使原材料厂商深度参与产品设计阶段，同步开发适配的加工工艺。建立动态库存管理系统，基于历史数据与实时订单预测优化备货策略，缩短交付周期。针对关键元器件实施“双源供应”策略，通过产能备份保障供应链韧性。

#### 4.3.3 促进企业间的技术交流与合作

搭建航空制造技术交流平台，定期举办工艺创新大赛、技术沙龙等活动，鼓励企业展示最新研究成果。建立专利交叉许可机制，推动成熟技术在行业内快速扩散应用。组建联合研发团队攻克行业共性难题，如大尺寸复合材料构件固化变形控制、多机器人协同装配路径规划等。开展“标杆工厂”观摩活动，推广智能制造示范线的建设经验。鼓励龙头企业向中小供应商输出技术标准和管理规范，通过驻厂指导、人员借调等方式实现技术转移<sup>[4]</sup>。

### 结束语

航空领域智能制造工艺的创新是推动我国航空产业迈向全球价值链中高端的关键引擎。通过技术创新突破核心装备瓶颈、人才培养构建复合型队伍、产业协同完善生态体系，可有效破解当前制造效能与质量瓶颈。未来需持续深化数字化、网络化、智能化融合，以数据驱动重构生产模式，以跨界协同激发创新活力。

### 参考文献

- [1]宋家认.浅析水利水电工程中质量监督管理存在的问题与解决对策[J].珠江水运,2021,(18):80-81.
- [2]许宝宁.浅析水利工程质量监督管理工作中的问题及对策[J].建筑工程技术与设计,2021,(22):3562.
- [3]张继武.水利工程质量监督管理工作管理中存在的问题及对策研究[J].建筑工程技术与设计,2022,(15):2826-2826.
- [4]齐旭,李莹,焦展.水利工程质量监督管理工作中的问题及对策分析[J].建筑工程技术与设计,2022,(24):2631.