

数字化装配技术在制造业中的应用分析

解倩靓

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要 数字化装配技术作为连接设计端与生产端的核心纽带,是重塑产业竞争力的关键引擎。本文简要分析数字化装配技术的优势,重点强调数字化装配技术在航空航天领域、汽车制造领域、消费电子领域、工业机械领域的具体应用,并提出加强数字化装配技术在制造业中的应用措施,探讨其在赋能制造业高质量发展中的战略价值与实践路径,以期能够为相关人员提供参考。

关键词 制造业;数字化装配技术;虚拟装配;全流程数字化平台

中图分类号: F42

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.022

0 引言

随着工业互联网、人工智能、数字孪生等技术的深度融合,传统装配模式正经历着从“经验驱动”到“数据驱动”的范式变革。装配过程从依赖人工技艺转向基于实时数据的智能决策,装配质量从事后检测转向全流程预测性管控,装配资源从孤岛式运作转向跨企业协同共享。这一转变不仅显著提升了装配效率与精度,更推动了制造业向服务型制造、大规模定制等新业态延伸。

1 数字化装配技术的优势

1.1 提升效率

借助工业物联网(IIoT)进行实时数据采集,实现设备状态、工艺参数、物流信息等的秒级同步,与数字孪生技术构建的虚拟装配环境相配合,可预先对生产过程进行模拟并优化方案,把装配规划时间减少50%以上。在执行层面,机器视觉与AI算法的深度融合,使机器人可以自主开展高精度定位、缺陷检测及自适应调整,缺陷识别的精准度提升至99%,从而减少人工复检环节;智能拧紧系统可依据工况态势动态调控扭矩参数,避免因拧紧力度过紧或欠紧出现的返工,单工位效率实现30%的提升。数字化平台打破了信息孤岛,实现供应链、生产及质量数据的无缝隙对接,利用大数据分析精确预测设备故障及质量隐患,非计划停机的时长降低了40%,订单交付周期缩短了25%,该“数据驱动+智能执行”模式,正改变着制造业的效率边界。

1.2 优化质量

通过工业物联网及唯一标识技术,实时记录下每个零部件的原材料批次、加工参数、装配记录以及检测数据,再关联到产品数字档案,若出现质量方面的

问题,能实现“一键追溯溯源”,与传统方式相比,定位效率提升90%以上。在流程管控环节,机器视觉系统与AI算法的深度融合,实现装配缺陷识别精度达微米级,可自动进行对划痕、裂纹、错位等30余种缺陷类型的检测,识别准确率达98%以上,极大地降低了人工目检存在漏检的概率。借助数字孪生技术构建的虚拟装配环境可提前模拟工艺参数对质量的影响,以仿真优化实现装配不良率降低60%,依靠大数据分析打造的质量预测模型,可预先预警潜在的质量风险,推动质量管控从“事后检验”向“事前预防”转变,辅助企业实现“零缺陷”生产目标。

1.3 降低成本

借助工业物联网实时采集的设备能耗、物料损耗、工时利用率等数据,依托AI算法构建的动态成本模型,可以精准估算生产波动对成本的影响大小,实现设备能耗降低20%、物料损耗降低15%。就工艺优化方面而言,数字孪生技术借助虚拟装配仿真,提前检查装配顺序与工装的匹配情况,杜绝因设计有缺陷导致的返工,单次试制成本降低达40%;智能拧紧系统借助扭矩大数据进行分析,自动调整参数,减少螺栓过紧或欠紧引起的材料损耗,工具维护成本下降了35%。数字化平台把供应链与生产数据打通,凭借需求预测与智能排产,实现库存周转率提升50%,减少资金占用所产生的成本,应用质量追溯系统后,次品召回与返修成本降低了60%,质量损失成本占比从8%降低到2%,该“数据驱动+智能执行”模式,推动对制造业成本结构的重塑,助力企业实现降本增效。

1.4 柔性生产

借助工业物联网(IIoT)与数字孪生技术,企业可实时反映物理装配线的运行状态,且凭借虚拟仿真

迅速验证工艺调整方案,把换型时间从传统模式的数小时压缩至 15 分钟以内,满足多品种、小批量订单迅速切换的需求。智能物流系统与 AGV(自动导引车)深度融合,促使物料配送路径可依生产计划动态优化,缩短因缺料造成的停机等待时长,设备综合利用率提高 40%。模块化装配工装与机器人柔性编程技术相结合,使同一条生产线可兼容不同规格产品的装配作业,工艺调整成本降低了 70%。

大数据驱动的产能预测模型可提前识别订单波动风险,采用智能排产系统动态优化产能负荷,避免出现过度生产及资源闲置状况。该“虚拟验证+动态调度”的柔性化生产模式,不仅提高了企业面对市场变化的响应效率,还借助资源的高效复用降低了多品种生产产生的额外成本,为制造业的转型升级注入新的发展动力^[1]。

2 数字化装配技术的具体应用

2.1 虚拟装配与工艺规划

数字化装配技术中的虚拟装配与工艺规划是推动制造业智能化升级的核心环节。通过构建产品的三维数字模型,并结合虚拟仿真平台,可在物理装配前对产品进行全方位的“预装配”验证。这一过程不仅涵盖零部件的几何干涉检查,更深入装配路径规划、工装夹具设计以及人机工程学分析。例如:在汽车制造领域,工程师可利用虚拟装配技术,在计算机中模拟发动机、变速箱等复杂总成的装配过程,提前发现并解决零部件之间的干涉问题,优化装配顺序,从而避免在物理试装阶段因设计缺陷导致的反复修改,显著缩短研发周期^[2]。

同时,虚拟装配技术还可结合工艺规划工具,对装配流程进行精细化设计。通过模拟不同装配策略下的生产效率、资源消耗以及质量稳定性,工程师能够选择最优的工艺方案。例如:在航空航天领域,针对飞机机翼等大型结构件的装配,虚拟装配技术可精确规划装配路径,确保每个紧固件的拧紧顺序与扭矩值符合设计要求,同时避免对周围结构造成损伤。此外,该技术还可评估装配过程中工人的操作舒适度与安全性,提前发现潜在的人机工程学问题,从而优化工作站布局,提升装配效率与工人满意度。

2.2 汽车制造领域

在焊装车间内,机器人借助视觉识别系统可实时获取焊点位置,借助激光传感器,把车身匹配精度提高到 ± 0.05 mm,切实降低白车身返修数量;在总装的操作环节,智能拧紧系统借助扭矩大数据分析自动调

整参数,达到螺栓预紧力一致性 99.5% 的水平,同时借助 RFID 技术实现零部件全生命周期追溯。柔性生产线借助数字孪生技术构建虚拟装配模型,可迅速验证各型车辆的装配工艺,将换型时间从传统模式的数小时缩短至 15 分钟以内,保障多品种共线生产的实现。在质量管控方面,AI 视觉质检系统以每秒 30 帧速率对车身表面进行扫描,缺陷识别的准确率超 98%,进而自动生成质量分析报告。数字化装配平台实现了 ERP、MES 与设备层数据的打通,做到物料精准配送及设备预测性维护,使库存周转率提升 50%,设备停机时间减少 40% 的效果,这些技术突破不仅重塑了汽车制造的工艺流程,还凭借数据驱动的智能决策体系,为车企构建起柔性化、高效化、高质量的生产新范式^[3]。

2.3 消费电子领域

在智能手机组装环节,依托机器视觉的柔性装配系统可实现 0.01 mm 级精度微型元件的定位,与六轴机械臂一起完成摄像头模组、电池等精密部件的毫米级装配,单台设备节拍缩短至 8 秒/件,和传统人工操作相比,效率提高 5 倍。智能拧紧系统借助扭矩传感器与 AI 算法协同配合,实现 M0.6 规格螺丝预紧力 99.8% 的一致性,有效抑制因装配应力引起的性能衰减。在进行可穿戴设备生产时,数字化装配平台集成激光投影定位技术,可将柔性电路板(FPC)的贴装精度控制到 ± 0.02 mm 范围内,借助在线 AOI 检测系统实现 100% 全检覆盖,推动缺陷逃逸率下降到 0.2% 以下。

2.4 工业机械领域

在重型机床总装阶段,采用激光跟踪仪与视觉定位系统组合的混合装配技术,可帮助床身、立柱等超大型部件实现微米级对接,结合六自由度调姿平台自动补偿形变误差,实现导轨直线度偏差控制在 0.01 mm/m 以内,装配效率提升了 60%。在风电齿轮箱生产阶段,智能拧紧系统凭借多轴同步控制和扭矩曲线分析行星轮系预紧力分布均匀性为 99.7%,有效降低了传动噪声及早期失效的概率^[4]。

在工程机械的液压管路装配方面,AR 辅助装配系统能实时将三维管路模型与真实工件进行叠加,协助工人完成异形管件的精准拼合,安装错误率下降了 95%。依托数字化装配平台的支撑,企业凭借数字孪生技术搭建起虚拟装配车间,可预先验证各型号设备的装配工艺,把试产周期缩短到原时长的 60%;工业物联网与 MES 系统的融合,能够实现设备状态数据、质量检测数据与生产计划的实时协同,做到装配资源的动态调度及质量风险的预先预警,这些技术突破不但解决了大型装备装配精度控制、多源误差耦合等问题,更凭借

数据驱动的智能决策体系，为工业机械的高效化、高可靠制造提供支持。

3 加强数字化装配技术在制造业中应用的措施

3.1 构建全流程数字化平台

该平台以三维数字模型当作核心载体，借助集成多物理场仿真技术，能在虚拟环境中对装配工艺进行提前验证与优化，对不同装配顺序中的干涉风险、应力分布与精度持续性进行模拟，将传统试错式工艺开发周期缩短 50% 以上。在工艺规划阶段，基于知识图谱的智能工艺决策系统可自动筛选出最优装配方案，通过数字孪生技术生成动态装配工艺路线，促使装配资源与生产节拍相符合。

在生产执行阶段,平台借助物联网终端实时采集设备状态、扭矩数据、温湿度等工艺参数,形成装配过程数字主线,运用机器视觉及力觉传感技术,构建智能装配工作站,能自主识别零件特征、检测装配质量且自适应地调整装配参数,实现装配精度的微米级调控。在复杂装备的装配方面,凭借增强现实(AR)技术提供三维装配引导,工人戴上智能眼镜后,即可获取虚拟叠加的装配路径及关键参数,极大地降低了对技能的依赖度^[5]。

产品质量管控阶段，平台整合多源异构数据，基于大数据分析机器学习算法构建质量预测模型，可以提前识别潜在的质量隐患并触发预警，依托区块链技术实现装配过程数据的不可篡改存储，为产品全生命周期追溯提供可信的数据支撑。

3.2 建立质量追溯与闭环管理体系

该体系围绕产品数字档案这一核心运作，借助物联网标识技术给每个零部件赋予唯一的身份编码，实时采集从原材料入厂到成品出厂的全生命周期数据，包括供应商信息、加工参数、装配记录、检测结果等关键质量相关要素，构建起可追溯的质量数据链条。在装配实施的环节，智能拧紧系统与视觉检测设备自动记录扭矩曲线、尺寸偏差等工艺参数，通过数字孪生技术打造虚拟装配模型，实现装配流程与质量数据的实时映射。

闭环管理机制借助大数据分析 with AI 算法运行，对质量数据展开深度挖掘，通过建立质量预测模型，系统可预先识别潜在风险点并触发预警，如基于扭矩数据预测螺栓的松动倾向，利用尺寸偏差分析预测装配间隙超差风险，针对已存在的质量问题，体系会自动生成改进工单，随后推送至责任部门，同步借助历史

数据与工艺知识库提供优化方案推荐,通过数字化平台实时检验改进效果,促成“问题发现—分析改进—效果验证”的PDCA循环。

3.3 构建数字化装配产业协同网络

此网络以工业互联网平台作为底层架构，借助边缘计算节点实现装配设备、检测仪器、物流终端等异构系统的互联互通，构建覆盖供应商、制造商、物流商及终端用户的实时数据流。在产品的设计之初，多主体在线协同得到协同网络支持，设计师可凭借云端实现三维模型与装配工艺数据的共享，与供应商实时探讨零件可装配性，运用数字孪生技术模拟装配流程，提早识别设计瑕疵并改进装配规划，把设计迭代周期缩短 60% 以上。

生产实施阶段, 协同网络构建起基于数字孪生的虚拟装配车间, 实时反映物理车间设备情形、物料库存及订单的进程情况, 运用 AI 算法对生产数据进行动态分析, 系统可自动对装配节拍作出调整、优化物流配送的路径, 实现装配资源的高效统筹。若出现设备故障以及质量异常时, 协同网络会触发跨企业应急响应机制, 自动调配周边供应商的备件资源或实现生产能力互通, 维持装配线持续运转^[6]。

4 结束语

通过工业互联网、数字孪生、智能传感等技术的深度融合，实现了装配过程的精准感知、动态优化与全生命周期追溯，显著提升了生产效率、装配精度与质量稳定性。尤其在复杂装备制造领域，数字化装配技术有效解决了传统模式下的工艺验证周期长、质量波动大、资源协同难等痛点，为多品种小批量生产提供了柔性化解决方案。

参考文献:

- [1] 黄浩,徐子贤.制造业数字化转型与产业融合:产品创新的视角[J].中国软科学,2025(01):47-57.
- [2] 成新轩,丰义,李明峰.制造业数字化转型与绿色技术创新的关系研究[J].工业技术经济,2025,44(01):115-121.
- [3] 伦健.制造业数字化转型中的关键技术与策略分析[J].中国科技期刊数据库工业 A,2024(07):45-48.
- [4] 胡凤,李漫青,宾宁.企业数字化能力影响因素分析:以广东省制造业为例[J].中国商论,2024(01):57-60.
- [5] 陈旭升,杨云慧,张晋硕.数字化融合赋能制造业技术创新:基于电子信息制造业的实证分析[J].科技和产业,2024,24(01):231-238.
- [6] 同 [2].