

Research on the Application of Precision Automated Intelligent Assembly Technology in Aerospace Manufacturing

Shanning Li¹ Hang Li² Yan Qin¹ Ming Lv¹ Jie Hu¹

1. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing, 100000, China

2. Unit 93160, Beijing, 100000, China

Abstract

Aerospace products generally have the characteristics of complex structure, diverse models, small batch size and extremely high precision requirements. The traditional assembly mode mainly based on humans is difficult to meet the requirements of high precision, high consistency and high reliability. This paper, in response to the assembly requirements of typical aerospace structural components, proposes a precision automated intelligent assembly system based on highly flexible vehicles and machine vision. The system effectively resolves the challenges of rapid line changing and precise assembly in multi-variety and small-batch production through multi-sensor fusion positioning, modular reconfigurable tooling, and adaptive control strategies. Experiments show that this method significantly improves assembly quality and efficiency, reduces manual intervention, and provides a feasible technical approach for the automated assembly of complex aerospace products.

Keywords

Aerospace assembly; intelligent assembly; automation; flexible tooling; machine vision; precision assembly

精密自动化智能装配技术在航天制造中的应用研究

李珊宁¹ 李航² 秦琰¹ 吕明¹ 胡婕¹

1. 北京遥感设备研究所, 中国 · 北京 100000

2. 93160 部队, 中国 · 北京 100000

摘 要

航天产品普遍具有结构复杂、型号多样、批量小、精度要求极高的特点, 传统以人为主的装配模式难以满足其高精度、高一致性与高可靠性的要求。本文面向航天典型结构件的装配需求, 提出一种基于高柔性载具与机器视觉的精密自动化智能装配系统。系统通过多传感器融合定位、模块化可重构工装和自适应控制策略, 有效解决了多品种、小批量生产中快速换线与精密装配难题。实验表明, 该方法显著提升了装配质量和效率, 降低了人工干预, 为航天复杂产品自动化装配提供了可行的技术途径。

关键词

航天装配; 智能装配; 自动化; 柔性工装; 机器视觉; 精密装配

1 引言

航天装备制造是国家安全和战略发展的核心领域, 其产品质量与可靠性直接关系到在轨寿命和任务成败。随着我国航天事业的飞速发展, 型号研制周期不断缩短, 产品更新换代加速, 传统依赖熟练工人经验的装配方式不仅效率低下, 而且难以保证批次间的一致性和可靠性。装配作为制造过程的最终环节, 其自动化程度已成为制约航天产品整体质量与产品提升的关键瓶颈。^[1]

近年来, 柔性装配系统 (FAS) 和智能装配技术成为国内外研究热点, 其核心点是通过感知、决策与执行的闭环控

制, 实现装配过程的智能化与自适应化。^[2] 然而, 现有技术面对航天产品极高的精度要求、多样的材料组合 (如复合材料、铝合金、钛合金等) 及复杂的结构形式时, 仍存在适应性不足、换线调整时间厂等问题。

本文立足航天制造的实际需求, 设计了一套集高精度自动化平台、高柔性载具与视觉引导于一体的智能装配系统, 重点解决了异性结构定位、快速换型以及装配过程可靠性控制等工程难题, 并对系统进行了实验验证与分析, 以期为推动航天精密装配的自动化升级提供参考^[1]。

2 自动化平台设计

面向航天电子设备腔体、支架等典型部件的装配需求, 本文开发的自动化装配平台采用模块化架构, 主要包括: 高精度点胶装配模组, 适应航天密封与粘接工艺要求; 双轴伺

【作者简介】李珊宁 (199812), 女, 中国山西临汾人, 助理工程师, 本科, 从事工艺技术研究。

伺服驱动移动滑台，定位精度优于 $\pm 5 \mu\text{m}$ ；防静电型物料自动供给器，避免对产品的损伤；搭载实时内核的工控一体机，负责多轴运动协调与数据采集；模块化可调节夹具工装，支持快速重构。该系统通过 EtherCAT 总线进行高速通信，确保各单元同步控制，满足航天装配对时序精度的苛刻要求。实物图见图 1 全自动装配设备。



图 1 全自动装配设备实物图

图 1 全自动装配设备

3 高柔性工装载具设计

为解决装配产品结构多样的特点，设计了一种高柔性工装载具，该载具由升降装置、可移动滑杆、滑块销钉、弹簧压板组成。模型图见图 2 高柔性工装载具示意图。

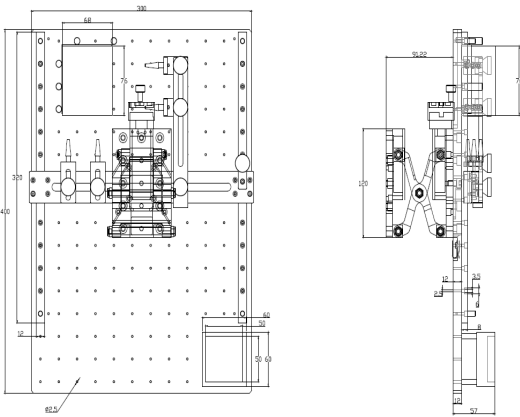


图 2 高柔性工装载具示意图

3.1 零点定位模块

采用仿航天对接机构的精密圆柱销网格阵列系统，实现载具与产品、载具与平台之间的快速、精确找正与锁紧，重复定位精度高，为不同结构产品的混线生产奠定了基础。

3.2 自适应升降与调平机构

集成高精度红外信号探测与升降微调机构，可检测产品高度并实时调整 Z 向高度，使待装配平面始终与设备作业基准面保持一致，消除产品因高度差异导致的装配应力与

误差。

3.3 可重构夹紧与限位机构

通过移动滑杆、滑块销钉和模块化压头组合，实现了对多种外形（方形、异形）产品的柔性夹持。特别针对航天产品轻质薄壁的特点，设计了基于恒力弹簧的压板机构，提供恒定且可调的压紧力，有效防止在装配过程中产品发生相对位移^[2]。

3.4 表面处理与防护技术

针对航天产品对洁净度与防划伤的严格要求，对铝合金载具进行了阳极化处理并喷涂耐磨抗腐蚀涂层。在所有产品接触的表面铺贴航天级防静电氟橡胶垫，完美解决了产品划伤与静电释放（ESD）风险。

改造后的工装载具如图 3 高柔性工装载具改造后。

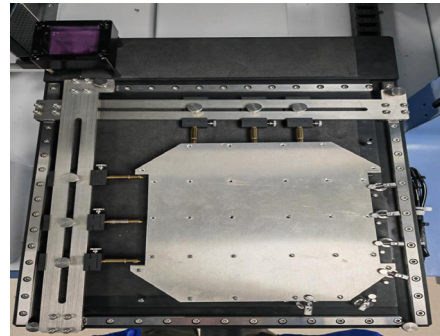


图 3 高柔性工装载具改造后

4 基于数字孪生的工艺流程优化

构建了装配系统的数字孪生模型，通过虚实联动对传统装配流程进行仿真分析与优化。新的智能流程合并了冗余工步，实现了视觉引导、螺钉拧紧、胶体固化等多工序的并行作业，将换线时间缩短了 70% 以上，显著提升了产线整体效率。

5 可靠性分析

为保证装配过程的可靠性，我们需要对装配过程本身进行相应的检验，其中包括全自动装配设备的检验及高柔性工装载具的检验。

5.1 装配过程在线检测与闭环控制^[3]

系统集成基于深度学习的视觉检测单元，可对螺钉规格、胶液完整性等进行 100% 在线检查。螺钉拧紧采用扭矩—转角—曲线监控策略，确保每一个连接点都符合工艺规范，数据实时记录，实现全流程质量追溯。

5.2 系统可靠性设计与分析

遵循航天装配高可靠性的设计准则，采用冗余设计（如双备份气路、关键传感器冗余）和故障预测与健康管理（PHM）技术。通过 FMECA（故障模式、影响与危害性分析）对系统进行可靠性建模，针对识别出的高风险环节进行了设计改进，有效降低了系统故障率^[3]。

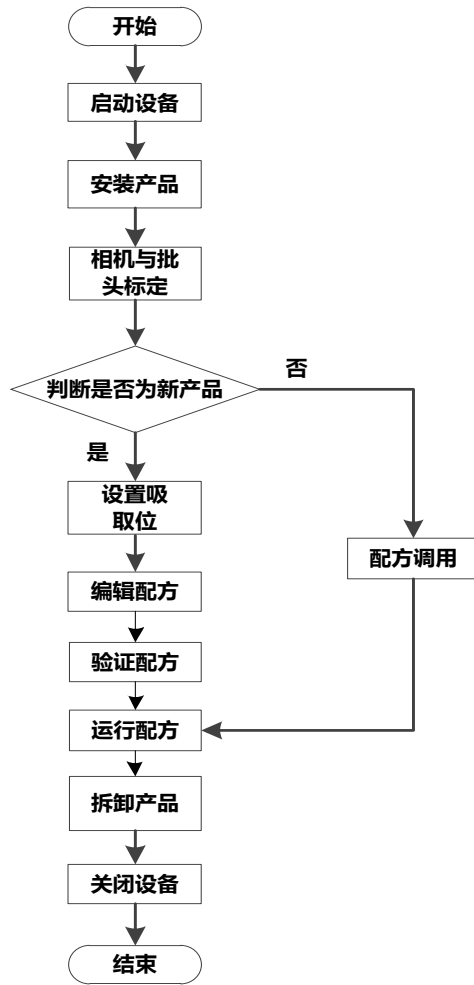


图4 全自动装配设备操作流程

6 结语

本研究成功研制了一套适用于航天精密产品的高柔性自动化智能装配系统，通过了典型产品的装配验证。结果表明：

系统能够兼容多种规格产品的混线自动化生产，换型时间短，适应航天多品种、小批量生产模式；装配质量一致性好，产品一次装配合格率提升至 99.5% 以上；

显著降低了对操作技能的依赖，提高生产效率。

参考文献

- [1] 沈晓飞. 航天总装工艺信息化的探索与实践[J]. 电子世界. 2014.01.22。
- [2] 刘维来. 柔性装配系统的规划和建模方法研究[J]. 中国科学技术大学. 2007.04.16-18。
- [3] 张贞子, 罗兵. 机器人视觉定位系统的研究与实现[J]. 哈尔滨工业大学学报. 1997.06.89-89。