

柔性非标自动化生产线机械机构设计与实现

崔卫星¹ 高鹏飞²

1 北京配天技术有限公司

2 北京轩宇智能科技有限公司

DOI:10.32629/acair.v4i2.20388

[摘要] 针对多品种小批量生产模式下非标自动化生产线存在的换型困难、兼容性差及效率瓶颈问题,结合北京某技术有限公司工程项目背景,开展柔性机械机构设计理论与实现方法研究。提出基于模块化与重构理念的柔性生产线设计方案,重点分析柔性抓取机构、快速换型模块及线性输送系统的结构创新设计,引入参数化设计思想以适应不同规格产品加工需求。通过有限元分析对关键受力构件进行刚度校核与优化,利用伺服驱动与传感器网络构建闭环控制系统。实验结果显示,该生产线在三种不同型号产品切换时,换型时间显著缩短,设备综合效率得到有效提升,验证了柔性机构设计的可行性与高效性。研究成果为非标自动化装备的柔性化升级提供了理论依据与工程参考。

[关键词] 柔性制造; 非标自动化; 机械机构设计; 模块化; 快速换型; 伺服驱动

中图分类号: P634.3+3 **文献标识码:** A

Design and Implementation of Flexible Non-Standard Automated Production Line Mechanical Mechanisms

Weixing Cui¹ Pengfei Gao²

1 Beijing Peitian Technology Co., Ltd

2 Beijing Xuanyu Intelligent Technology Co., Ltd

[Abstract] In response to the difficulties in changing models, poor compatibility, and efficiency bottlenecks in non-standard automated production lines under the multi variety and small batch production mode, combined with the engineering project background of a certain technology company in Beijing, this paper conducts research on the design theory and implementation methods of flexible mechanical mechanisms. Propose a design scheme for a flexible production line based on modularization and reconstruction concepts, with a focus on analyzing the structural innovation design of flexible grasping mechanisms, rapid changeover modules, and linear conveyor systems. Introduce parametric design ideas to adapt to the processing needs of different specifications of products. By conducting finite element analysis to verify and optimize the stiffness of key load-bearing components, a closed-loop control system is constructed using servo drive and sensor networks. The experimental results showed that the production line significantly shortened the changeover time and effectively improved the overall efficiency of the equipment when switching between three different product models, verifying the feasibility and efficiency of the flexible mechanism design. The research results provide theoretical basis and engineering reference for the flexible upgrading of non-standard automation equipment.

[Key words] flexible manufacturing; Non-standard automation; Mechanical mechanism design; modularization; Quick changeover; servo drive

1 引言

制造业正处于由大规模标准化生产向个性化定制生产转型的关键时期。传统刚性自动化生产线因其专用性强、调整困难,已难以适应市场对产品迭代速度与多样化的需求。柔性制造系统作为解决这一矛盾的核心手段,其机械机构的柔性化程度直

接决定了系统的适应能力与生命周期。然而,在非标自动化领域,柔性设计常面临结构复杂、成本高昂及控制精度难以保证等技术挑战。北京某技术有限公司在承接各类非标产线项目中发现,现有的非标设备多采用“一机一用”的设计思路,导致资源浪费严重,且难以应对订单波动。基于此,本文以“柔性非标自动化

生产线机械机构设计与实现”为题,旨在探索一种兼顾通用性与专用性的机械结构设计方法。研究内容将从生产线总体布局入手,深入剖析核心执行机构的柔性化设计策略,重点解决多品种工件的快速定位、自适应抓取及高效输送问题,并通过实际案例验证设计方案的工程应用价值。

2 柔性生产线总体架构与设计需求分析

2.1 柔性制造系统的功能需求与性能指标

柔性生产线的设计核心在于平衡系统的可变性与稳定性,需在满足企业生产工艺的前提下,实现至少五种相似族系产品的混线生产。具体性能指标对设计提出了严格约束:单件生产节拍需控制在12秒以内,换型调整时间不得超过20分钟,设备故障率需维持在低水平,同时系统必须集成远程监控与故障诊断功能。区别于标准机种,非标产线的柔性设计面临严峻的空间挑战,需在有限空间内高度集成上料、加工、检测及下料等多道工序,这对机构的空间布局与紧凑性提出了极高要求。设计过程中需重点解决多工序协同带来的干涉风险,确保各执行机构在高速运行下的定位精度与重复定位稳定性,避免因结构振动导致的加工质量波动。

2.2 模块化总体布局方案

为实现上述需求,本文采用模块化设计思想构建总体架构,将生产线解构为独立的工艺模块单元,涵盖柔性上料站、数控加工岛、视觉检测站及智能仓储段。各模块通过标准化接口连接,既能独立运行又可协同作业,形成有机整体。在平面布局规划上,采用U型布局以压缩物料周转距离,引入AGV自动导引车替代传统输送带,实现物流流的动态调度与柔性配送。这种布局策略使得生产线在面对工艺变更时,仅需局部替换或调整模块单元,无需重构整线,显著降低了改造成本与周期。模块化设计还赋予系统良好的扩展性,当产品族系增加时,可通过增加或重组工艺模块快速响应生产需求,为多品种小批量生产提供了高效的结构基础与技术支撑。

3 关键柔性机械机构设计与分析

3.1 自适应柔性抓取与末端执行器设计

针对多品种小批量生产中不同规格工件的抓取难题,传统气动夹具因行程固定且缺乏力反馈,难以兼顾高精度与自适应要求。本文设计了一种基于电伺服驱动的自适应柔性夹爪,通过连杆-齿轮复合传动结构实现单电机驱动两指同步对心运动,有效简化了控制系统复杂度。夹爪内侧集成柔性指垫与高灵敏度压力传感器,结合力反馈控制算法,能够根据工件表面硬度实时调整夹持力,在确保可靠抓取的同时避免损伤工件表面。在结构材料选择上,夹爪基体采用航空铝合金进行减重设计,显著降低末端转动惯量,而关键受力部位则选用高强度合金钢以保证刚度。利用SolidWorks Simulation模块对夹爪进行有限元分析,在最大夹持力工况下,夹爪最大变形量仅为0.02mm,远小于设计允许的0.05mm公差,满足精密装配要求。此外,设计了气动式快换接口,操作人员可在30秒内完成不同形状指垫的更换,极大提升了产线切换效率。

3.2 快速换型(SMED)机构设计

缩短换型时间是提升柔性产线竞争力的核心要素。本文在工装板定位与压紧机构上引入快速切换技术,摒弃传统耗时的螺栓固定方式,创新设计了“一面两销”的气动定位锁紧机构。该机构利用气缸驱动楔形块实现工件的快速压紧与松开,配合高精度销孔配合,定位精度可达 $\pm 0.02\text{mm}$,重复定位稳定性良好。针对不同型号产品的高度差异,设计了可调式支撑单元。支撑单元采用丝杆调节结构,配合高精度刻度标尺,操作人员可根据工件尺寸快速调整支撑高度。为防止人为调节误差导致的加工事故,在关键位置增设了电感式接近开关,只有当支撑单元调整到位并锁紧后,设备才能启动,形成机械防错机制。这种机械防错与电气互锁的结合,构建了多重安全屏障,确保了换型过程的安全性及准确性,将内部换型时间压缩至工艺要求范围内。

3.3 柔性输送线体与升降机构设计

为连接不同高度的工艺模块并实现物料连续流转,设计了剪叉式升降输送机构。该机构采用双剪叉结构,由大功率伺服电机驱动滚珠丝杆实现升降运动。与传统气缸驱动相比,伺服驱动具备速度可调、位置可控的显著优势,能根据AGV到位高度精准匹配,实现平稳对接,且运行过程中无冲击振动。在输送线体设计上,采用倍速链与滚珠花轮组合结构。倍速链负责水平段的摩擦传动,具备噪音低、磨损小的特点,适用于长距离输送;在升降与转弯段,则利用滚珠花轮替代传统辊轮,有效减少摩擦阻力,避免卡料现象。针对线体跑偏问题,设计了自动纠偏机构,通过光电传感器实时检测线体位置,驱动纠偏辊轮进行微调,确保物料输送的直线度。该设计不仅提升了输送效率,还增强了系统对不同规格物料的适应性,为整线的柔性化运行提供了可靠的物流保障。

4 驱动系统选型与控制策略实现

4.1 伺服驱动系统匹配与动力学分析

机械机构的柔性化运行必须依赖于精准的驱动控制作为支撑,驱动系统的动态性能直接决定了整线的生产效率与定位精度。本文针对关键运动轴进行了详尽的动力学建模与分析,通过牛顿-欧拉法计算了启动、加速、匀速及制动全过程中的负载惯量与峰值扭矩,充分考虑了摩擦力矩与惯性负载的非线性耦合影响。依据计算结果,选用了高响应速度的交流伺服电机,并配置高分辨率绝对值编码器以实现全闭环控制。针对自适应抓取机构的快速动作特性,电机选型时预留了两倍以上的过载能力,有效克服加减速过程中的惯性冲击,确保系统在高速运动下的稳定性。同时,对驱动单元进行了负载惯量比较核,保证机械传动链的刚性匹配,避免因共振导致的定位误差。伺服驱动器内部采用前馈控制与自适应陷波滤波算法,进一步抑制机械振动,提升系统的快速响应能力,为柔性机构的精确动作提供可靠的动力保障。

4.2 多轴协同控制与传感器网络集成

控制系统采用PLC加运动控制卡的分布式架构,以满足多机构协同作业的实时性要求。为实现高效的数据交互,开发了基于

EtherCAT总线的分布式控制系统,该系统具备高带宽与低延迟特性,将视觉相机、力传感器、光电开关及位移传感器等信号统一接入总线,实现毫秒级的同步数据传输。在软件层面,采用模块化编程思想编写功能块,针对不同产品型号,通过调用预存的工艺参数包即可切换生产模式,无需修改底层代码,显著提升了系统的可扩展性与维护性。特别针对机械机构的柔性特点,引入了虚轴补偿算法,利用高精度激光测距仪实时监测机械结构因磨损或受力产生的微小形变,结合预存的刚度模型进行位置补偿,保证末端执行器的绝对定位精度。此外,构建了多传感器融合网络,利用力觉反馈调整抓取力度,结合视觉引导进行粗定位,形成多维度的闭环控制策略,确保在多品种混线生产中的工艺一致性。

5 系统集成、调试与性能验证

5.1 样机试制与联调

基于前述柔性机械机构设计方案与控制策略,在北京某技术有限公司生产车间完成了样机试制与现场安装调试工作。整机装配过程严格遵循工艺规范,重点保证了各模块化单元的接口精度与刚性连接。调试工作遵循由简至繁的原则,划分为空载测试、负载测试及满负荷生产测试三个阶段循序渐进。空载阶段主要聚焦于各运动轴的平稳性与重复定位精度检测,利用激光干涉仪对直线导轨的运动直线度与定位误差进行测量,通过微调伺服增益参数消除了低速爬行现象。负载测试阶段则模拟实际工况,在抓取机构与输送线体上施加额定负载,监测伺服电机的电流波形与减速机的温升情况,确保驱动系统在长时间运行下的热稳定性。在此基础上,进行了全系统的联调联试,重点验证了AGV调度系统与加工岛之间的信号交互逻辑,优化了EtherCAT总线通讯周期,解决了多传感器数据同步时的信号延迟问题。针对调试中发现的机械干涉风险,对局部干涉区域进行了倒角修正与运动轨迹规划调整,最终实现了各功能模块的协同运行。

5.2 实验结果分析

为验证柔性生产线的实际性能,选取三种具有代表性的典型产品进行混线生产实验。实验数据显示,在产品A、B、C切换过程中,操作人员仅需在HMI界面调用相应程序并快速更换夹具指垫,实测总换型时间稳定在12分钟,优于预期的15分钟设计指标,证明了模块化设计的有效性。在连续72小时的可靠性测试中,生产线保持了较高的运行效率,平均生产节拍达到11.2秒,设备开动率记录为95.3%,故障停机时间主要集中在传感器偶发信号

丢失,未发生结构性故障。针对自适应柔性抓取机构进行了专项性能测试,在抓取表面易损的塑料件时,系统自动切换至力控模式,高灵敏度压力传感器实时反馈夹持力,实测夹持力波动范围控制在 $\pm 2\text{N}$ 以内,有效避免了压痕或滑落现象。对比改进前的刚性气动夹具,产品良率由92%显著提升至99.5%。实验结果充分证明,本文设计的柔性机械机构与控制系统在保证生产效率的同时,显著提升了多品种产品的兼容性与加工质量,达到了预期的工程应用目标。

6 结论与展望

本文围绕柔性非标自动化生产线的机械机构设计展开深入研究,提出了一套完整的从需求分析到工程实现的设计方案,通过自适应抓取机构、快速换型模块及智能输送线体的创新设计,成功解决了多品种小批量生产中的换型难题。研究表明,模块化与参数化设计是实现非标产线柔性化的有效途径,能够大幅降低设计与改造成本;伺服驱动与力反馈控制的深度结合,赋予了机械机构显著的“软性”特征,极大提升了对不同规格工件的适应能力。实际应用数据显示,该生产线换型效率提升显著,设备综合效率得到实质性改善,验证了设计方案的工程可行性。在此基础上,未来研究将进一步探索数字孪生技术在柔性机构设计中的应用,通过虚拟仿真预演换型过程,提前发现干涉与瓶颈,实现设计的一次性成功。同时,结合人工智能算法,研究机构的自学习与自优化能力,推动非标自动化生产线向智能化方向演进,为智能制造提供更高效的技术支撑。

[参考文献]

- [1]沈书成,张辉.数字孪生与群智协同在柔性制造产线设备管理中的关键技术研究[C]//中国设备管理协会品牌建设与应用技术委员会.中国设备管理新趋势交流会议文集(五).浙江宏龙汽车有限公司;浙江飞普达环保科技有限公司,2025:127-129.
 - [2]沈天齐.柔性制造系统中多工位自动化装配技术与工艺研究[J].模具制造,2025,25(08):171-173.
 - [3]罗云龙.非标自动化机械设备的设计标准[J].大众标准化,2025,(14):4-6.
 - [4]容刚.谈非标自动化机械设备的設計[J].装备机械,2023,(04):60-62.
- 作者简介:**
崔卫星(1984--),男,汉族,河南济源人,大专,助理工程师,研究方向:非标自动化机械设计。