

# 机械装配工艺的优化与研究

蒋 通

苏州江南航天机电工业有限公司 江苏 苏州 215000

**摘要:** 机械装配工艺的优化是提升生产效率与产品质量的关键。当前,机械产品多具连接形式多样、结构复杂等特点,传统工艺存在劳动强度大、效率低等问题。优化策略包括:引入自动化装配设备与数字化技术,如虚拟装配仿真,提前发现装配问题;优化装配顺序与流程,采用模块化、并行装配方式;加强人员培训与标准化管理,提升操作熟练度与一致性。通过多维度优化,可显著缩短装配周期、降低成本、提高产品质量。

**关键词:** 机械; 装配工艺; 优化方法

引言:在制造业高速发展的当下,机械装配作为产品成型的关键环节,其工艺水平直接影响产品的性能、质量与成本。传统机械装配工艺多依赖人工经验,存在效率低下、精度不稳定、资源浪费等问题,难以满足现代制造业对高质量、低成本、短周期的迫切需求。因此,对机械装配工艺进行优化研究,不仅有助于提升企业核心竞争力,更是推动制造业向智能化、精益化转型的重要途径。本文旨在探讨机械装配工艺的优化策略,为行业提供参考。

## 1 机械装配工艺基础理论

### 1.1 装配工艺概述

(1) 装配的定义与分类:装配是按设计要求,将零件、组件等连接成完整机械产品的过程。按装配地点稳定性,分为固定装配(产品固定在特定工位,人员、设备移动操作,适用于大型、重型产品,如机床床身装配)、移动装配(产品随生产线移动,人员、设备在固定工位作业,适合批量生产,如汽车零部件装配);按自动化程度,有自动化装配(借助机器人、自动输送设备完成,效率高、精度稳定,常用于电子元件装配)及手动装配(依赖人工操作,适用于复杂、高精度或小批量产品,如精密仪器装配)。(2) 装配工艺流程设计原则:需遵循并行工程原则,在产品的设计阶段同步考虑装配工艺,提前解决装配冲突,缩短研发周期,如汽车设计时同步规划发动机与底盘装配流程;遵循模块化设计原则,将产品拆分为多个独立模块分别装配,再整合,便于维护与批量生产,如电脑主机按主板、电源等模块装配。

### 1.2 装配精度与误差分析

(1) 装配精度的影响因素:零件加工误差是基础因素,如零件尺寸、形状偏差会直接影响装配精度;装配方法至关重要,互换装配法、分组装配法等不同方法对精度控制不同,分组装配法可提升精度;工具精度不可

忽视,如扳手、量具的精度误差会传递到装配结果中<sup>[1]</sup>。(2) 误差传递模型与累积效应分析:误差传递模型用于描述零件误差在装配过程中的传递规律,通过建立数学模型量化误差传递程度;累积效应分析关注多个零件误差在装配后产生的叠加效果,若误差同向累积,会严重影响产品装配精度,需采取措施规避。

### 1.3 装配工艺优化关键指标

(1) 效率:核心是缩短装配时间,通过合理规划工序、减少等待时间实现,如优化零件配送顺序;节拍优化需使各装配工位节拍一致,避免出现瓶颈工位,提升整体生产线效率。(2) 质量:以保证装配精度为核心,通过改进装配方法、提高工具精度实现;可靠性需确保装配后的产品在使用过程中性能稳定,减少故障发生,如加强关键部位装配质量检测。(3) 成本:控制人力成本,通过提高工人操作熟练度、合理安排人员配置实现;降低设备成本,合理使用设备、延长设备使用寿命;减少材料成本,避免零件浪费、优化材料采购方案。

## 2 机械装配工艺现状分析

### 2.1 典型机械产品装配工艺案例分析

(1) 以工业机器人为例:工业机器人装配涵盖机械结构、电气系统、控制系统等多模块整合。首先进行基座与机身装配,需保证基座水平度与机身垂直度,采用高精度水平仪与激光测量仪校准;接着装配关节部件,包括谐波减速器、伺服电机与轴承,谐波减速器安装需严格控制输入轴与输出轴同轴度,偏差需控制在0.02mm以内;随后进行机械臂与关节连接,通过扭矩扳手按预设扭矩紧固螺栓,确保连接强度;最后完成电气布线、传感器安装与控制系统调试,通电测试各关节运动精度与响应速度,确保机器人重复定位精度达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 标准。(2) 现有装配流程图与关键工序分析:装配流程为“基座预处理→机身装配→关节部件组装→机械臂连接→

电气系统集成→控制系统调试→性能检测→成品入库”。关键工序集中在关节部件组装与性能检测：关节部件组装直接影响机器人运动精度，需通过专用工装夹具定位，搭配扭矩监控系统保证螺栓紧固一致性；性能检测采用激光跟踪仪测量各关节运动轨迹，对比设计参数调整控制程序，若轨迹偏差超差，需拆解关节重新校准，此工序占整体装配时间的30%，是决定产品质量的核心环节。

## 2.2 现存问题诊断

(1) 瓶颈工序识别：人工操作繁琐问题突出，关节部件组装中谐波减速器与电机的同轴度校准依赖人工调整，需反复测量与微调，单台装配耗时约40分钟，占关节装配总时间的60%；定位精度低体现在基座与机身装配阶段，传统人工划线定位方式误差较大，易导致后续关节装配出现累积偏差，需额外投入20%时间进行二次校准，严重制约装配效率。(2) 资源浪费分析：重复定位现象普遍，机械臂与关节连接时，因工装夹具定位基准磨损，平均需3次重复定位才能满足装配要求，每次定位耗时约5分钟，造成工时浪费；工具更换频繁问题显著，装配过程中需交替使用扭矩扳手、激光测量仪、水平仪等12种工具，工具切换与校准平均耗时15分钟/台，且部分专用工具闲置率达40%，设备资源利用率低<sup>[2]</sup>。(3) 质量缺陷原因：松动问题多源于螺栓紧固工艺，部分操作人员未严格按扭矩标准作业，导致约5%的机器人在试运行阶段出现关节螺栓松动；间隙不均主要出现在轴承装配环节，轴承与轴套配合间隙需控制在0.01-0.03mm，因零件加工尺寸波动与人工装配经验差异，约8%的产品存在间隙超差，引发关节运动异响与精度衰减。

## 3 机械装配工艺优化方法研究

### 3.1 基于精益生产的装配流程优化

(1) 价值流图(VSM)分析装配流程：通过绘制现有装配流程的价值流图，标注各工序的作业时间、等待时间、搬运距离等数据，清晰识别增值活动与非增值活动。例如在工业机器人装配中，借助VSM可发现关节部件校准后存在20分钟等待时间，以及基座搬运过程中存在重复迂回路径，为后续优化提供数据支撑。同时，结合产品生产节拍，分析各工序负荷均衡性，找出流程中的薄弱环节，为流程重构奠定基础。(2) 消除浪费：针对VSM识别出的搬运浪费，通过重新规划车间布局，将零件存放区设置在装配工位附近，采用AGV自动导引车实现零件精准配送，缩短搬运距离，如将工业机器人关节部件搬运距离从50米缩减至10米，搬运时间减少60%。对于等待浪费，优化零件供应节奏，采用“准时化生产”模式，确保前一工序完成后零件可立即进入下一工序，同

时合理安排设备维护时间，避免因设备故障导致的停工等待，如通过预防性维护将设备故障停机率从8%降至3%。(3) 生产线平衡(ECRS原则：取消、合并、重排、简化)：运用ECRS原则优化工序。“取消”冗余工序，如工业机器人装配中，取消重复的基座水平度检测工序，改为在装配前一次性完成高精度校准；“合并”相似工序，将电气布线与传感器安装两道分散工序合并为同一工位作业，减少工序切换时间；“重排”工序顺序，将耗时较长的关节部件组装工序提前，与其他短耗时工序并行开展，提升整体效率；“简化”复杂工序，如将人工手动调整谐波减速器同轴度，改为使用专用校准工装，简化操作步骤，缩短作业时间<sup>[3]</sup>。

### 3.2 基于数字化技术的装配工艺优化

(1) 数字化双胞胎(DigitalTwin)在装配仿真中的应用：构建机械产品与装配生产线的数字化双胞胎模型，通过仿真模拟实际装配过程。例如在发动机装配中，利用数字化双胞胎模拟活塞与气缸的装配过程，可提前发现活塞安装角度偏差问题，避免实际装配中的返工。同时，通过仿真分析不同装配参数(如螺栓紧固扭矩、装配顺序)对产品质量的影响，优化参数设置，如通过仿真确定发动机缸盖螺栓最佳紧固顺序，使螺栓受力均匀性提升25%。此外，还可借助数字化双胞胎模拟生产线产能，预测瓶颈工位，提前调整生产计划。(2) 虚拟装配(VirtualAssembly)与碰撞检测：在虚拟环境中完成产品装配过程，无需实物零件即可验证装配可行性。以减速器装配为例，通过虚拟装配可直观展示齿轮、轴承等零件的装配路径，检测零件间是否存在空间干涉。利用碰撞检测功能，能精准识别装配过程中的零件碰撞风险，如发现减速器箱体与输入轴在装配过程中存在0.5mm的碰撞间隙，及时调整零件结构或装配顺序，避免实际装配中的零件损坏。同时，虚拟装配可记录装配过程数据，为后续工艺改进提供参考<sup>[4]</sup>。(3) 装配序列规划与路径优化算法：基于遗传算法、蚁群算法等智能算法，对装配序列与路径进行优化。在工业机器人装配中，传统装配序列依赖人工经验，易出现工序混乱问题。通过遗传算法对装配序列进行迭代优化，可生成最优装配顺序，如将工业机器人12道装配工序的最优序列确定后，装配时间缩短15%。路径优化算法则针对零件装配路径进行规划，在保证装配精度的前提下，减少装配路径长度与转弯次数，如优化机械臂关节轴承装配路径，使装配路径缩短20%，提升装配效率。

### 3.3 基于智能装备的自动化装配优化

(1) 工业机器人协作装配技术：引入协作机器人与

人工协同作业,弥补传统自动化装配灵活性不足的问题。在汽车发动机装配中,协作机器人负责重型零件(如曲轴)的搬运与定位,人工则完成精密部件(如喷油嘴)的安装,两者通过传感器实现安全交互,避免碰撞风险。同时,协作机器人可通过力传感器感知装配力,实时调整作业力度,如在发动机缸体与缸盖装配中,协作机器人根据反馈的压力数据,精准控制拧紧力度,确保密封性能,使装配合格率提升至99.5%。(2)视觉引导与力反馈控制技术:视觉引导技术通过工业相机获取零件位置与姿态信息,引导装配设备精准定位。在电子元件装配中,视觉系统可识别元件引脚位置偏差,引导机械手调整抓取角度,定位精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$ 。力反馈控制技术则能实时监测装配过程中的作用力,如在轴承装配中,当检测到装配力超过阈值时,自动调整装配速度或停止作业,避免零件过盈损坏,降低质量缺陷率。(3)柔性装配工装设计:采用模块化、可调节的柔性工装,适应多品种、小批量产品装配需求。例如在减速器装配中,柔性工装通过更换定位模块,可实现不同型号减速器的定位装配,无需重新设计专用工装,切换时间从4小时缩短至30分钟。同时,柔性工装配备高精度传感器,可实时监测工装定位精度,当出现偏差时自动调整,确保装配一致性,如通过工装自动校准,使减速器轴承装配同轴度误差控制在 $0.02\text{mm}$ 以内。

#### 3.4 装配误差补偿与质量控制

(1)误差源建模与补偿策略:对装配过程中的误差源(如零件加工误差、工装定位误差、人工操作误差)进行建模,量化各误差源对装配精度的影响程度。例如在工业机器人关节装配中,通过建立误差模型,确定谐波减速器加工误差对关节运动精度的影响权重达60%。基于误差模型制定补偿策略,采用SPC统计过程控制技术,对关键工序的误差数据进行实时采集与分析,当发现误差超出控制范围时,及时调整工艺参数,如通过SPC监控发现

机器人基座水平度偏差增大,立即调整工装定位,使偏差恢复至允许范围<sup>[5]</sup>。(2)在线检测与反馈调整技术:在装配过程中引入在线检测设备,实现实时质量监控。采用激光跟踪仪对工业机器人关节装配精度进行在线检测,可实时获取关节位置偏差数据,检测精度达 $\pm 0.005\text{mm}$ 。构建传感器网络,在装配工位布置力传感器、位移传感器等,实时采集装配力、零件位移等数据,通过数据传输系统将信息反馈至控制系统,控制系统根据反馈数据自动调整装配参数,如当传感器检测到螺栓紧固扭矩不足时,自动控制扳手增加扭矩,确保螺栓紧固质量,减少松动缺陷。同时,在线检测数据可存储至数据库,为后续质量追溯与工艺改进提供依据。

#### 结束语

机械装配工艺的优化研究,是推动制造业迈向高质量发展的重要实践。通过对装配流程、技术应用、装备升级及质量控制等多维度的深入探索,我们不仅有效解决了传统工艺中的效率瓶颈与质量隐患,更显著提升了装配的自动化、智能化水平。未来,随着新技术、新装备的持续融入,机械装配工艺将更加高效、精准、灵活,为制造业的转型升级注入强劲动力,助力我国从制造大国向制造强国稳步迈进。

#### 参考文献

- [1]程卫国.工程机械装配工艺现状与发展趋势[J].中国设备工程,2023,(05):98-100.
- [2]秦勇坚.互联网视域下的机械装配工艺关键技术研究[J].互联网周刊,2023,(03):57-59.
- [3]王明.机械装配工艺流程优化及效率提升研究[J].机械工程,2020,12(3):47-58.
- [4]王相淋.机械装配工艺与关键技术探析[J].中国机械,2023(25):33-35.
- [5]罗乔.试论机械装配工艺与关键技术[J].中小企业管理与科技,2020(6):159-160.