

# 自动化铆接装配的效率与精度提升策略

郑蔚

中国航空工业集团哈飞 黑龙江哈尔滨 150060

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17698

**[摘要]** 随着制造业自动化与智能化的快速发展,自动化铆接装配在航空航天、汽车、船舶等高端装备制造领域的应用日益广泛。然而,当前生产过程中仍面临效率不足与精度波动等问题。本文从工艺流程优化、设备与夹具柔性化改进、自动送料与物流系统集成、智能调度与信息化管理、人机协同模式创新等方面提出效率提升策略,并从高精度定位与夹紧、在线检测与误差补偿、力学参数优化、智能质量控制与闭环反馈等角度分析精度提升路径。研究表明,通过工艺优化与智能化控制相结合,不仅能够显著提高铆接装配的生产节拍和设备利用率,还能保障装配的一致性和可靠性,为高端制造业的质量提升与转型升级提供参考。

**[关键词]** 自动化铆接; 装配效率; 装配精度; 智能制造; 工艺优化

铆接作为一种可靠的连接方式,广泛应用于飞机蒙皮、汽车车身及轨道交通装备的结构制造中。传统的手工铆接虽然能够满足部分装配需求,但在面对大规模生产和高精度要求时,容易受到工人经验、作业环境和设备条件等多重因素的影响,导致生产效率低、装配精度波动大。随着智能制造与工业4.0理念的深入发展,自动化铆接装配逐渐成为主流<sup>[1]</sup>。其依托于柔性设备、智能监测与信息化系统的集成,不仅能提升生产节拍,还能有效控制装配质量。然而,在实践中仍存在效率提升与精度控制的矛盾,如如何在缩短生产周期的同时确保高可靠性连接,如何在多品种小批量条件下保持装配一致性等。针对这些问题,本文系统分析了影响自动化铆接效率与精度的主要因素,并提出了相应的提升策略,以期为行业发展提供理论参考与实践路径。

## 1、自动化铆接装配技术概述

### 1.1 铆接装配的工艺原理与特点

铆接是一种通过塑性变形将两种或多种零部件紧密连接的机械加工艺,广泛应用于航空航天、汽车制造和轨道交通等领域。其基本原理是利用铆钉在施加外力作用下发生塑性变形,填充连接件孔壁,从而形成具有较高抗剪切和抗疲劳性能的连接点。与焊接、螺栓连接相比,铆接具有连接可靠性强、残余应力小、适用于多层或异种材料连接的优势。然而,传统手工铆接效率低下,劳动强度大,且依赖操作人员经验,容易产生连接质量波动。自动化铆接装配则通过机械化与信息化手段显著提升了工艺稳定性,使得连接过程更加精确和高效。

### 1.2 自动化铆接装配的设备与系统构成

自动化铆接装配系统通常由铆接主机、工装夹具、送料

与定位系统、传感监测装置以及信息控制平台等部分组成。其中,铆接主机承担铆钉成形与连接任务,柔性化夹具则保证零部件的精准定位与夹紧,避免装配过程中产生位移误差。送料与定位系统可实现铆钉的自动供给和快速切换,提高生产连续性。传感与监测装置能够实时采集铆接过程中的力、位移、温度等关键参数,实现在线质量检测与误差补偿。此外,信息控制平台通过与MES、PLC等系统联动,实现工艺数据的记录、分析与优化,从而形成闭环控制体系。该类系统的协同运行不仅显著提升了铆接装配的生产效率,还有效保障了连接精度与一致性。

## 2、自动化铆接装配的效率与精度影响因素

### 2.1 工艺参数的设定与控制

铆接过程中涉及的压力、速度、温度以及铆钉材料的力学性能等工艺参数,是决定效率与精度的核心因素。如果铆接压力不足,容易导致铆钉成形不充分,产生连接松动或强度不足;若压力过大,则可能造成零件孔壁损伤甚至裂纹扩展,影响结构安全。铆接速度的快慢直接关系到生产节拍与节能效果,但过快的速度会增加零件振动和定位偏差,从而降低精度。温度控制在热铆接中尤为重要,温度不足会导致铆钉塑性不足,而过高则可能改变材料组织性能。只有通过精确设定和智能调控这些工艺参数,才能在提升效率的同时兼顾装配精度与稳定性。

### 2.2 装配夹具与定位系统的稳定性

夹具与定位系统是保证铆接零件相对位置精确性的关键,其设计与刚性水平直接影响最终装配质量。若夹具存在变形或定位精度不足,零件在铆接过程中可能产生微小位移,导致孔位错位或连接偏差,严重时甚至引发报废。现代自动

化铆接广泛采用柔性夹具与数控定位系统，以应对复杂结构件和多规格零件的装配需求。同时，夹具的快速换型能力和自适应调整功能，也对整体生产效率有显著影响。因此，提升夹具与定位系统的稳定性和灵活性，是提高铆接装配效率与精度的核心条件之一。

### 2.3 设备性能与自动化水平

自动化铆接装配的核心设备包括铆接机床、送料系统及控制单元，其性能优劣直接决定了生产效率与产品精度。高性能设备能够在高速运行下保持稳定的力学输出和重复精度，而低性能设备往往在长时间运行后出现精度漂移或能耗增加。此外，自动化程度的高低也影响效率与精度：高度自动化系统可通过传感器与智能算法实现工艺参数的实时监控和误差补偿，减少人工干预带来的不确定性，从而保证一致性与稳定性。设备性能与自动化水平的不足，不仅会限制生产效率，还可能导致批量生产中装配质量的波动<sup>[2]</sup>。

### 2.4 材料特性与零件质量

铆钉和被连接零件的材料性能是影响效率与精度的重要因素。不同材料在塑性、强度、硬度及热处理状态上存在差异，直接影响铆钉成形质量和最终连接强度。如果零件孔径加工精度不高，或存在毛刺、表面缺陷，会增加铆接过程中的摩擦和不确定性，降低装配精度。特别是在铝合金、钛合金等轻质高强材料的应用中，对铆接工艺的适应性提出了更高要求，需要优化参数并辅以表面预处理工艺。同时，材料的一致性 & 批次稳定性，也关系到大规模生产中效率与精度的可控性。

### 2.5 过程监测与质量控制

铆接过程本身存在动态变化和多种不确定因素，若缺乏有效的监测与控制，容易导致效率下降和精度失控。现代自动化铆接通常通过力、位移、声发射信号以及视觉传感器进行实时监测，确保铆接过程符合工艺要求。一旦发现偏差，系统可立即进行修正或报警，避免产生批量性缺陷。同时，过程数据的采集与分析有助于建立质量追溯体系，实现对工艺波动的统计控制。这种基于过程监测的质量控制方式，不仅提升了装配精度，还能缩短返修时间，从而整体提高生产效率。

## 3、自动化铆接装配的效率提升策略

### 3.1 工艺流程的优化与重构

自动化铆接装配的效率很大程度上取决于工艺流程的科学性与合理性。传统的顺序化作业模式容易导致设备等待、

工序衔接不畅以及生产节拍失衡，从而使得产线整体效率下降。通过对工艺流程进行系统性优化，可以采用多工序并行、缩短中间搬运路径、减少非增值环节等方式，使装配节拍更加紧凑和均衡。例如，将铆钉预处理、零件定位与初步检测等工序并行开展，不仅能够减少设备的空闲时间，还能提升整体节奏的协调性。同时，借助数字化仿真平台对流程进行建模和动态演练，可以提前识别瓶颈工位并制定优化方案，使生产组织更加科学高效。

### 3.2 装配设备与夹具的柔性化改进

在多型号、多规格零件混合生产的环境下，设备与夹具的柔性化水平直接决定了生产效率。传统固定式夹具往往需要耗费大量时间进行拆装与调试，导致换型周期过长，严重影响生产节拍。通过引入模块化工装、自适应夹具和数字化参数调节技术，可以实现快速切换和精准定位，大幅缩短换型时间并降低人工调整的复杂度。与此同时，现代自动化铆接设备普遍配备伺服驱动与智能控制系统，能够根据不同工件自动调整铆接参数，从而实现“一机多用”。这种柔性化改进不仅提升了生产线的适应能力，还增强了整体运转效率与设备利用率。

### 3.3 自动送料与物流系统的集成

在铆接装配过程中，物料供应的速度与准确性是决定效率的重要因素。人工送料方式容易出现供料不及时、摆放不准确甚至错误上料等问题，造成工序中断或返工，极大影响生产效率。为此，现代自动化生产广泛采用自动送料机、机器人搬运系统和智能物流平台，实现铆钉与零部件的快速、精准配送。这些系统通过与生产控制平台无缝对接，使物流配送与装配节拍实现实时同步，有效避免了工位等待和在制品堆积。此外，结合 RFID、条码等信息化技术，可以对物流流转进行全程跟踪和动态调度，不仅提升了效率，也为后续精益生产和精确管理提供了支持。

### 3.4 智能调度与信息化管理

随着数字化转型的推进，智能调度与信息化管理在提升装配效率中的作用日益凸显。通过将 MES、ERP、APS 等系统与生产线深度融合，可以实现对任务分配、设备稼动率、工序进度等的实时监控与动态优化，从而保证产线资源的最优配置。与传统依赖人工经验调度相比，信息化管理能够显著降低人为不确定性和调度滞后问题，使生产过程更加透明化和可控化。同时，基于大数据与人工智能的预测性分析，可对潜在的效率瓶颈进行提前预警与调整。例如，当某工位效

率下降时,系统能够自动优化排产,将部分作业任务分流至备用工位,确保产线整体高效稳定运行<sup>[3]</sup>。

### 3.5 人机协同与作业模式创新

尽管自动化水平不断提高,但在复杂工况和特殊结构件装配中,人工仍然不可或缺。通过优化人机协同模式,可以实现效率的进一步提升。协作机器人能够承担重复性、高强度和危险性较高的工序,而人工则负责灵活性和判断力要求较高的环节,如异常处理、工艺调整和质量检验。这种分工使机器人高效率与人工高灵活性优势互补,整体效率大幅提高。同时,结合岗位设计创新与作业模式优化,可以减少重复劳动与冗余动作。例如,在部分工序中,机器人完成预紧与初步铆接,人工只需进行终检与微调,显著缩短作业时间。随着增强现实(AR)、可穿戴设备等新技术的引入,人机协作水平将进一步提升,推动自动化铆接装配向高效率、高灵活性方向发展。

## 4、自动化铆接装配的精度提升策略

### 4.1 高精度定位与夹紧技术

在铆接过程中,零部件的相对位置精度直接决定了最终装配质量。若定位不准确或夹紧不稳固,即便铆接工艺参数控制得当,也可能导致孔位错位、铆钉偏斜甚至连接强度不足。为此,现代自动化铆接系统广泛采用数控定位平台、自适应夹具以及激光/视觉辅助定位技术,以实现高精度控制。通过柔性夹具实现多方向夹紧,可有效避免因零件变形或振动引起的装配误差。同时,采用实时反馈的定位系统,能够在装配过程中不断修正微小偏差,从而保证每个铆接点的几何精度与一致性。

### 4.2 在线检测与误差补偿机制

铆接过程本身具有动态性和不确定性,传统事后检测往往存在滞后性,难以及时发现和纠正偏差。为提升精度,现代系统普遍引入力传感器、位移传感器及声发射监测装置,对铆接力学参数和变形情况进行实时监控。一旦发现异常偏差,系统能够通过误差补偿机制自动调整工艺参数,例如改变铆接压力、速度或路径,以保证连接质量稳定。同时,结合数字孪生技术建立虚拟模型,可以预测和模拟潜在误差,并在实际生产中加以修正。这种“监测—反馈—补偿”的闭环控制模式,有效提升了装配精度和一致性。

### 4.3 铆接力学参数的优化控制

铆钉的成形过程受压力、速度、温度等多种因素影响,

这些参数控制不当会导致铆钉成形不足、孔壁损伤或连接不均匀,从而降低装配精度。通过优化铆接力学参数,使铆钉在受力和塑性变形过程中达到最佳状态,是提升精度的重要策略。例如,在铝合金等轻质高强度材料铆接中,适当降低铆接速度、分阶段施加压力,可以避免孔壁应力集中;而在钛合金材料中,则需要通过控制温度与速度匹配来改善塑性流动性。此外,现代系统利用传感器与智能算法对铆接过程进行实时分析与修正,使工艺参数始终保持在最优区间,从而确保装配的精确性和稳定性。

### 4.4 智能质量控制与闭环反馈系统

为了实现高精度装配,质量控制必须贯穿整个生产过程,而不仅仅依赖最终检验。智能质量控制体系通过整合多种传感器、视觉检测和大数据分析手段,能够在生产过程中实时识别缺陷并进行反馈。对于检测出的孔位偏差、铆钉成形不良等问题,系统可以立即调整相关工艺参数,避免缺陷扩大或批量化。与此同时,所有工艺数据都会被记录并输入质量数据库,便于后续的统计分析和工艺优化。通过这种闭环反馈机制,自动化铆接不仅能实现对单一零件的高精度保证,还能在批量生产中保持整体一致性和可靠性,从而显著提升装配精度。

## 结语

自动化铆接装配作为现代制造业的重要环节,其效率与精度的提升不仅关系到单一工艺环节的优化,更直接影响整条生产线的综合效能与最终产品的质量水平。通过工艺流程重构、柔性化装备应用、自动物流与信息化调度的深度融合,可以有效提升生产效率;通过高精度定位、在线监测、参数优化与闭环质量控制的协同作用,则能显著改善装配精度。二者相辅相成,为企业在提升产能的同时保证质量一致性提供了可行方案。

## [参考文献]

- [1]何清,程长,丛永超.浅谈自动化装配检测线中铆接机的几种卸载方式[J].科技致富向导,2014(3):1.
- [2]王建,刘浩,田威,等.面向飞机自动化装配的制孔末端执行器的设计[J].南京航空航天大学学报,2012,44(B04):4.
- [3]杨迪.飞机壁板自动钻铆中预连接工艺和铆接变形研究[D].浙江大学[2025-09-25].