

基于智能制造技术的数控加工精度提升策略与实践应用分析

金晓春

中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所 河南 洛阳 471000

摘要: 本文聚焦智能制造技术驱动的数控加工精度提升。阐述了智能制造技术内涵,分析数控加工精度影响因素,包括机床自身、加工过程控制及外部环境因素。提出数字化建模与仿真、智能感知与自适应控制、数据驱动误差补偿、智能检测与质量追溯等提升策略。通过航空航天、汽车制造等典型应用场景及企业案例分析,展示实践效果。最后探讨智能制造技术与数控系统融合路径及生产线级精度优化方法,为行业发展提供参考。

关键词: 智能制造; 数控加工; 加工精度; 技术策略; 实践应用

1 智能制造技术

智能制造技术是现代制造业与新一代信息技术深度融合的产物,正深刻变革传统生产模式。其核心在于通过物联网、大数据、人工智能、数字孪生等前沿技术,实现生产全要素、全流程的智能化管理与协同。该技术依托高度互联的设备和系统,实时采集生产数据,借助AI算法进行精准分析与决策,优化资源配置,提升生产效率与灵活性。智能制造技术构建了虚实映射的数字孪生体系,支持产品从设计、仿真到制造的全程可视化与迭代优化,显著缩短研发周期。通过自动化机器人、智能仓储物流等系统的集成应用,智能制造技术实现了生产过程的无人化或少人化,降低人力成本,增强生产安全性与可靠性。这一技术不仅推动制造业向高端化、智能化迈进,更为全球产业竞争注入新动能。

2 数控加工精度影响因素分析

2.1 数控机床自身因素

数控机床自身的性能和质量对加工精度有着至关重要的影响。机床的几何精度是指机床在不运动或运动速度较低时的精度,如床身导轨的直线度、工作台面的平面度、主轴的回转精度等。这些几何误差会直接影响工件的加工精度。主轴的回转精度不高,会使刀具在切削过程中产生振动和跳动,影响加工表面的质量和尺寸精度。机床刚度是指机床系统抵抗变形的能力,在切削力的作用下,机床的部件会产生弹性变形,如床身、立柱、主轴箱等^[1]。如果机床刚度不足,变形量就会较大,从而导致刀具与工件之间的相对位置发生变化,影响加工精度。特别是在加工大型、重型工件或进行强力切削时,机床刚度的影响更为显著。数控机床的传动系统主要包括丝杠、螺母、齿轮等传动部件。这些部件的制造

精度、安装精度以及传动间隙等都会影响机床的运动精度。传动间隙的存在会使机床在反向运动时产生滞后现象,导致加工表面出现波纹和尺寸误差。

2.2 加工过程控制因素

加工过程控制的好坏直接关系到数控加工的精度。刀具的几何形状、尺寸精度和磨损程度对加工精度有很大影响。不同的加工材料和加工要求需要选择合适的刀具。刀具磨损后,其尺寸和形状会发生变化,导致加工出的工件尺寸超差和表面质量下降。切削参数包括切削速度、进给量和切削深度等。合理的切削参数能够保证加工效率和加工质量。如果切削参数设置不当,如切削速度过高,会导致刀具磨损加剧,甚至产生积屑瘤,影响加工表面质量;进给量过大,会使加工表面的粗糙度增加,尺寸精度降低。对刀是数控加工中的重要环节,对刀精度直接影响加工零件的尺寸精度。对刀不准确会使刀具的实际切削位置与编程位置产生偏差,导致加工出的工件尺寸不符合要求。

2.3 外部环境因素

外部环境因素也会对数控加工精度产生一定的影响。温度变化会导致机床部件的热变形,从而影响加工精度,例如,机床在长时间工作后,由于内部热源(如主轴电机、丝杠螺母副等)和外部热源(如环境温度)的影响,会使机床的温度升高,各部件的尺寸和形状发生变化,导致刀具与工件之间的相对位置改变。振动是影响数控加工精度的另一个重要因素,机床在加工过程中会受到各种振动的干扰,如机床本身的振动、外界的振动(如地面振动、附近设备的振动等)。振动会使刀具与工件之间的相对位置不稳定,导致加工表面出现振纹,降低加工精度和表面质量。数控机床中的各种电子

设备和控制系统容易受到电磁干扰的影响,电磁干扰会使数控系统的信号传输出现错误,导致机床的运动失控,从而影响加工精度。

3 智能制造技术驱动的数控加工精度提升策略

3.1 数字化建模与仿真技术

数字化建模与仿真技术是智能制造技术中提升数控加工精度的基础手段。利用三维建模软件,如SolidWorks、UG等,根据产品的设计图纸创建精确的三维模型。该模型不仅包含产品的几何形状,还涵盖材料属性、加工工艺要求等信息。在建模过程中,要确保模型的尺寸精度和几何公差符合设计要求,为后续的仿真分析提供可靠的基础^[2]。基于建立的数字化模型,运用专业的仿真软件,如Vericut、Mastercam等,对数控加工过程进行仿真。仿真内容包括刀具路径规划、切削力分析、加工变形预测等。通过仿真,可以直观地观察到刀具与工件的相对运动情况,发现刀具碰撞、过切或欠切等问题。同时还能分析切削力对工件变形的影响,提前调整加工工艺参数,如切削速度、进给量等,以减少加工变形,提高加工精度。根据仿真结果,对数控加工工艺进行优化。然后再次进行仿真验证,确保优化后的工艺能够满足加工精度要求。通过反复的仿真和优化,可以在实际加工前获得最佳的加工工艺方案,大大提高加工精度和效率。

3.2 智能感知与自适应控制技术

智能感知与自适应控制技术能够实时监测加工过程中的各种状态信息,并根据这些信息自动调整加工参数,以适应不同的加工条件,从而提高加工精度。在数控机床上安装多种传感器,如力传感器、位移传感器、温度传感器等,实时采集切削力、刀具位移、机床温度等信息。通过多传感器信息融合技术,将这些信息进行综合处理,获取更全面、准确的加工状态信息。基于采集到的加工状态信息,运用自适应控制算法对加工参数进行实时调整。例如,当切削力过大时,自动降低进给速度;当刀具振动剧烈时,调整主轴转速或切削深度。自适应控制算法可以根据不同的加工情况自动选择最优的加工参数,保证加工过程的稳定性和精度。智能感知技术还可以用于故障诊断。通过对传感器数据的分析,及时发现机床部件的故障隐患,如刀具磨损、主轴故障等。一旦检测到故障,系统可以自动采取容错控制措施,如切换到备用刀具、调整加工路径等,避免故障对加工精度造成严重影响。

3.3 数据驱动的误差补偿技术

数据驱动的误差补偿技术通过对大量加工数据的分

析和挖掘,找出影响加工精度的误差规律,并建立误差补偿模型,对加工误差进行实时补偿。在数控加工过程中,采集各种误差数据,如机床几何误差、热误差、刀具磨损误差等。通过对这些数据的分析,找出误差的主要来源和变化规律。根据误差数据分析结果,建立相应的误差补偿模型。误差补偿模型可以是基于数学公式的解析模型,也可以是基于机器学习的黑箱模型。将误差补偿模型集成到数控系统中,在加工过程中实时获取误差信息,并根据补偿模型对加工参数进行调整,实现误差的实时补偿。

3.4 智能检测与质量追溯技术

智能检测与质量追溯技术能够实时监测加工质量,并对加工过程进行全程追溯,及时发现质量问题并进行改进,从而提高数控加工的整体精度。采用先进的在线检测设备,如激光干涉仪、视觉检测系统等,对加工过程中的工件尺寸、形状、表面质量等进行实时检测。在线检测技术可以在加工过程中及时发现质量问题,避免不合格产品的继续加工,减少废品率。对在线检测数据进行实时分析,运用统计分析方法和机器学习算法,找出质量问题的规律和趋势。当检测到质量异常时,及时发出预警信号,提醒操作人员采取措施^[3]。建立完善的质量追溯系统,记录加工过程中的每一个环节的信息,包括加工工艺参数、操作人员、设备状态等。当出现质量问题时,可以通过质量追溯系统快速定位问题所在,分析原因并采取相应的改进措施。通过对质量追溯数据的分析,不断优化加工工艺和管理流程,提高数控加工的整体精度和质量水平。

4 实践应用分析

4.1 典型应用场景

航空航天结构件的高精度加工(如钛合金薄壁件);航空航天领域对结构件的精度要求极高,尤其是钛合金薄壁件。这类零件具有壁薄、结构复杂、刚性差等特点,在加工过程中极易发生变形,导致加工精度难以保证。智能制造技术为钛合金薄壁件的高精度加工提供了有效的解决方案。通过数字化建模与仿真技术,可以在加工前对零件的加工工艺进行精确模拟,预测加工变形,优化刀具路径和切削参数。智能感知与自适应控制技术能够实时监测加工过程中的切削力、振动等参数,自动调整加工参数以适应加工状态的变化,减少加工变形。数据驱动的误差补偿技术可以对机床的几何误差、热误差等进行实时补偿,进一步提高加工精度。例如,在某航空航天企业的实际生产中,运用智能制造技术加工钛合金薄壁件,将加工精度提高了30%,大大满足

了航空航天产品的设计要求。

汽车发动机关键零部件的批量生产(如曲轴、凸轮轴);汽车发动机关键零部件的批量生产对加工精度和一致性有着严格要求。智能制造技术可以实现生产过程的自动化和智能化,提高生产效率和产品质量。在曲轴、凸轮轴的生产中,数字化建模与仿真技术可以优化加工工艺,减少试切次数,缩短生产周期。智能感知与自适应控制技术能够实时监测刀具磨损、机床状态等信息,自动调整加工参数,保证加工质量的稳定性。数据驱动的误差补偿技术可以对生产过程中的误差进行实时补偿,提高产品的尺寸精度和形状精度。智能制造技术还可以实现生产过程的可视化和可追溯性,方便企业进行质量管理和生产调度。例如,某汽车发动机企业通过引入智能制造技术,实现曲轴、凸轮轴的高效批量生产,产品的一次合格率提高了25%,生产效率提高了40%。

4.2 案例企业分析

案例1:实施步骤;某航空制造企业首先构建了数字孪生模型,将实际机床、刀具、工件等设备的物理特性和加工过程进行数字化映射。然后,通过仿真优化工艺,在数字孪生模型中对不同的加工工艺进行模拟分析,找出最优的加工参数和刀具路径。最后,在实际加工过程中进行在线误差补偿,根据数字孪生模型的预测结果,实时调整机床的加工参数,补偿加工误差。效果评估;通过实施基于数字孪生的加工精度提升实践,该企业的加工精度提升了20%,废品率降低了15%。数字孪生技术的应用使得企业能够提前发现加工过程中的问题,优化加工工艺,减少了试切次数和废品产生,提高了生产效率和经济效益。

案例2:技术方案;某企业采用了振动传感器和机器学习算法来预测刀具寿命。在机床上安装振动传感器,实时监测刀具的振动信号。将采集到的振动信号输入到机器学习模型中,通过对大量历史数据的学习和分析,建立刀具磨损与振动信号之间的关系模型,从而预测刀具的剩余寿命。经济效益;基于智能感知的刀具磨损监测系统的应用,使该企业的刀具更换周期延长了30%,停机时间减少了25%。通过准确预测刀具寿命,企业可以合理安排刀具更换时间,避免因过早更换刀具造成的浪费和过晚更换刀具导致的加工质量问题,提高生产效率和设

备利用率,降低生产成本。

4.3 技术集成与系统优化

智能制造技术与现有数控系统的融合是实现数控加工精度提升的关键。一方面,可以通过开发专用的接口软件,将数字孪生、AI等功能模块与数控系统进行集成。例如,将数字孪生模型的仿真结果实时传输到数控系统中,为加工参数的调整提供依据^[4]。另一方面,可以对数控系统的硬件进行升级,提高其数据处理能力和通信能力,以适应智能制造技术的要求。在生产线级精度优化方面,MES可以发挥重要作用。MES可以对生产过程中的各个环节进行实时监控和调度,实现多工序的协同控制。通过MES,可以将不同工序的加工参数、质量要求等信息进行集成和共享,确保各工序之间的衔接顺畅。例如,在前一道工序完成后,MES可以将加工结果实时传输到下一道工序的数控系统中,下一道工序可以根据前一道工序的实际情况自动调整加工参数,从而提高整个生产线的加工精度和一致性。同时MES还可以对生产过程中的异常情况进行及时预警和处理,保证生产过程的稳定运行。

结束语

智能制造技术为数控加工精度提升带来全新契机。通过数字化建模、智能感知、误差补偿等策略,有效解决了机床自身、加工过程及外部环境等因素导致的精度问题。典型应用场景与企业案例验证了这些策略的有效性。未来,需进一步深化智能制造技术与数控系统的融合,优化生产线级精度控制,持续探索创新,推动数控加工向更高精度、更高效率迈进,为制造业高质量发展注入强劲动力。

参考文献

- [1]范文明.数控车床加工外圆尺寸精度控制的一种新方法[J].机械工程师,2022(12):163-165+172.
- [2]梁艳.数控车床主轴温度变化及对加工精度影响分析[J].科技视界,2022(32):23-26.DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2022.32.07.
- [3]刘学军.数控加工工艺与编程对零件质量控制的影响研究[J].内燃机与配件,2021(21):71-73.
- [4]王鹏.数控车床加工精度的影响因素及提高措施探究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(20):41-42.