

机械加工工艺优化与数字孪生技术的应用

孙誉宾 叶佳楠 胡江
(中机中联工程有限公司 重庆 400039)

摘要: 随着制造业的不断发展,机械加工工艺的优化已经成为提高生产效率、降低成本、确保产品质量的关键因素之一。传统的工艺优化方法面临着复杂加工环境和多变工件特性的挑战,因此需要更智能、精确的方法。数字孪生技术的兴起为工艺优化带来了新的机会,通过数字模拟物理实体的方式,可以实时监测、预测和优化机械加工过程中的各个环节,从而实现生产过程的数字化、智能化。本文深入探讨机械加工工艺优化与数字孪生技术的紧密结合,以期为制造业的发展提供新的思路和方法。

关键词: 机械加工工艺优化; 数字孪生技术; 切削参数; 刀具优化; 实时监测

1 机械加工工艺优化方法

1.1 传统工艺优化方法

1.1.1 切削参数的选择与调整

切削参数的选择与调整是在加工过程中至关重要的工艺优化步骤,包括切削速度、进给速度和切削深度等参数的合理确定。工程师在进行这一过程时必须充分考虑诸多因素,如材料的硬度、工件的要求以及所使用机床的性能等。例如,对于硬度较高的材料,工程师需要采用较低的切削速度和切削深度,以避免过度磨损而损坏刀具,保障加工质量。相反地,在高效率的粗加工中,可以适当增加进给速度,以提高生产效率。

此外,切削参数的选择也直接影响加工过程中的热量产生和剪切力分布。合理的切削参数可以有效地减少热变形,提高加工表面质量。同时,通过合适地调整切削参数,还可以降低刀具的磨损,延长其使用寿命,降低生产成本。

1.1.2 刀具材料与几何形状的优化

刀具材料和几何形状的选择对于工艺优化至关重要。不同的加工任务需要不同类型的刀具,因为它们面临不同的材料和工艺要求。例如,对于高速切削,硬质合金刀具通常更适合,它们具有出色的耐磨性和高温稳定性,因此可以在高速切削中保持刀具性能。而在需要高精度和表面光洁度的精密加工中,单晶金刚石刀具可能更合适,这是因为它们具有良好的耐磨性,能够提供卓越的切削质量。

此外,优化刀具的几何形状也可以显著提高加工效率和刀具寿命。选择适当的刃数、刃角和刃形可以改善切削过程中的刀具性能。例如,正确选择刃数可以平衡切削效率和切削力,确保加工稳定性;合适的刃角能够减少切削热的生成,并减小切削力,有助于延长刀具寿命;而优化的刃形设计可以提高切削效率和切削质量,减少加工过程中的振动和不稳定性。

1.1.3 工件夹持与装夹技术的优化

优化工件夹持与装夹技术有助于确保加工过程的稳定性和精度。工程师需要考虑工件的形状、尺寸和材料,选择适当的夹具类型和夹持方式,如表 1 所示。合理的工件夹持可以减少振动和变形,提高加工精度。此外,装夹技术的优化也可以减少装夹时间,提高生产效率。

1.2 先进优化方法的介绍

1.2.1 人工智能与机器学习在工艺优化中的应用

人工智能和机器学习在工艺优化中的应用给加工制造业带来革命性的变革。这些技术能够通过分析大量实时数据、训练模型,自动选择和调整切削参数,以实现更高效、更精确的工艺优化。举例来说,借助神经网络和深度学习算法,系统可以实时监测加工过程中的各种感知数据,如温度、振动、切削力等,然后根据这些数据来动态调整切削速度和进给速度,以适应材料性质的变化和工具磨损情况。这种实时的自适应控制可以显著提高加工质量、降低能耗,并延长刀具使用寿命,从而降低生产成本。

此外,机器学习还可以用于预测性维护,通过分

表 1 夹具类型和夹持方式

夹具类型	夹持方式	特点和应用场景
机械夹具	螺纹夹持、机械夹持臂、卡盘夹持	稳定性高，适用于加工刚性工件； 可靠的夹持力和刚度； 通常用于车床、铣床等加工中心的工件夹持
液压夹具	液压缸夹持	夹持力可调，适用于不同工件尺寸； 适用于自动化生产线； 可以实现高精度和高重复性的夹持，适用于精密加工
气动夹具	气缸夹持	快速夹持和释放； 适用于大量工件的批量生产； 高度可定制，可适应各种形状的工件夹持
真空夹具	吸盘夹持、真空台、真空吸附	适用于薄板、脆弱或不规则形状的工件； 无接触夹持，不会损坏工件表面； 用于木工、玻璃、塑料等行业的工件夹持
自适应夹具	弹性夹具、可变形夹具、智能夹具	可根据工件形状和尺寸自动调整夹持方式； 适用于多品种、小批量生产； 可减少夹具更换的次数，提高生产灵活性

析设备传感器数据，提前识别机床和刀具的潜在故障，从而减少生产中断和降低维修成本。同时，通过数据驱动的优化方法，制造企业可以实现全面的生产过程优化，包括供应链管理、库存控制、生产排程等方面，以实现更高的生产效率和客户满意度。

1.2.2 遗传算法与模拟退火算法的应用

遗传算法的应用在工艺优化中是非常灵活和广泛的。它模拟了生物进化的过程，通过交叉、变异等操作，从一个初始的参数组合群体中产生新的解决方案，然后根据适应度评估，筛选和保留优秀的解，并反复迭代，逐步优化。在机械加工中，可以用遗传算法来优化切削参数的组合，以达到最佳的加工效果。这种方法能够在解空间中广泛搜索，并找到全局或局部最优解。

相较之下，模拟退火算法则通过模拟物体在高温下冷却的过程来进行优化。它允许一定概率下接受劣于当前解的新解，以避免陷入局部最优解。随着迭代的进行，模拟退火算法逐渐降低“温度”，也就是减小接受劣解的概率，从而在解空间中逐渐收敛于最优解。

2 数字孪生技术

2.1 数字孪生的基本概念

数字孪生是一种将物理实体与其数字表示相结合的新兴技术。它通过数字孪生模型与物理实体的关系，将物理世界映射到数字世界中，以实现实时监测、分析和优化。数字孪生模型是对物理实体的虚拟复

制，反映了物理实体的结构、行为和性能。这种模型与实际物体之间的关系是双向的，允许在数字世界中进行实验、仿真和预测，以优化物理实体的运行和维护。在工程领域，数字孪生技术已经应用于各个方面，如产品设计、制造过程优化、设备维护和性能改进。

2.1.1 数字孪生模型与物理实体的关系

数字孪生模型是物理实体在数字世界中的虚拟副本，与物理实体密切关联。它们通过传感器和数据采集来获取实时信息，将物理实体的状态反映到数字孪生模型中。这使得工程师可以在数字环境中模拟和测试各种场景，预测物理实体的性能和行为，甚至进行虚拟维护和优化。通过这种关系，数字孪生技术使工程师能够更全面、实时地理解和干预复杂的工程系统。

2.1.2 数字孪生技术在工程领域的应用

数字孪生技术在工程领域有广泛的应用。在产品设计中，它可以用来优化原型设计，模拟不同设计选择的性能，减少试验和开发时间。在制造过程中，数字孪生可用于监测设备状态、预测设备故障，并优化生产流程以提高效率。此外，在设备维护和性能改进方面，数字孪生技术可以帮助工程师实时监测设备状态，提前识别问题并采取措施，从而降低维护成本并延长设备寿命^[1]。

2.2 数字孪生技术组成要素

2.2.1 传感器与数据采集

传感器可以安装在物理实体上，用于实时监测各

种参数,如温度、压力、振动、电流等。这些传感器收集的数据被传输到计算系统,以便后续的分析 and 建模。传感器的选择和布局至关重要,这是因为它们决定了获得的数据质量和覆盖范围。高质量的传感器数据是数字孪生模型的基础,用于准确反映物理实体的状态和行为。

2.2.2 数据处理与模型建立

数据处理与模型建立是数字孪生技术的核心环节。一旦收集到传感器数据,就需要对这些数据进行处理、清洗和整合,以消除噪声和错误,然后利用这些数据建立数字孪生模型。模型类型包括物理模型、统计模型、机器学习模型等,其可以采用各种技术,并且可以根据需要选择最适合的建模方法。模型建立的目标是准确地反映物理实体的行为,以便在数字环境中进行仿真、预测和优化。

2.2.3 模型验证与优化

验证是指将数字孪生模型的预测结果与物理实体的实际行为进行比较,以验证模型的准确性。如果模型与实际情况相符,那么可以信任它,用于预测和优化。但是,模型通常需要不断优化,以提高其预测性能。这可能涉及参数调整、模型更新或重新训练,以反映实际系统的变化。模型验证与优化是一个迭代的过程,通过不断改进模型,数字孪生技术可以更准确地反映物理实体的状态和行为。

3 机械加工工艺优化中数字孪生技术的应用

3.1 数字孪生模型在切削工艺优化中的应用

3.1.1 实时监测与调整切削参数

数字孪生技术在工艺优化中扮演着相当重要的角色,特别是在实时监测和调整切削参数方面。通过传感器实时采集切削过程中的各项参数,如切削速度、进给速度、刀具磨损程度等数据,并将其反映在数字孪生模型中,工程师可以获得对加工过程的高度精确的实时反馈,从而能够快速响应变化,及时采取措施以保证加工过程的稳定性和优质性。例如,数字孪生模型检测到切削力异常增加,这可能表明刀具磨损或者材料特性发生了变化,工程师可以利用这一信息迅速调整切削参数,如调整切削速度或刀具进给速度,从而避免不良加工,提高切削效率。

此外,数字孪生技术还能够提供历史数据的回顾和分析,帮助工程师优化切削参数的设定。通过对

过去加工过程的数据进行挖掘和分析,工程师可以识别出潜在的优化空间,进一步提升加工效率和工件质量。

3.1.2 预测切削过程中的异常情况

通过分析历史数据和实时监测,模型可以预测一系列关键指标,如刀具寿命、切削稳定性、工件表面质量等,这些指标对于加工过程的稳定性和质量至关重要。如果模型检测到潜在问题或异常情况的迹象,它可以提前发出警报,使工程师能够及时采取预防性措施。

例如,数字孪生模型预测到刀具即将达到寿命末期,工程师可以提前计划刀具更换,以避免刀具在加工过程中突然失效而导致生产中断。同样,如果模型检测到切削力振动或异常增加,可能表明切削稳定性有问题,工程师可以根据模型的预测结果,采取相应的措施,如调整切削参数或进行工件夹持的优化,以防止不良产品的产生。

3.2 数字孪生模型在刀具优化中的应用

3.2.1 刀具磨损与寿命预测

数字孪生模型在刀具磨损与寿命预测方面发挥着关键作用。通过结合传感器数据和模型分析,可以实时监测和记录刀具的关键参数,如磨损程度、温度和振动等。而模型可以综合这些信息,以更高的精度来预测刀具的寿命。准确的寿命预测在制造业中具有重大的意义:首先,准确的寿命预测可以避免刀具在工作过程中突然失效,从而降低了生产中断的风险,保障了生产的连续性;其次,准确的寿命预测也意味着减少了更换刀具的次数,降低了成本开支,提高了生产效率^[2]。

另外,数字孪生模型的预测能力有助于制造企业制定更合理的刀具维护计划。通过提前知晓刀具可能到达寿命末期的信息,企业可以有针对性地进行刀具更换,避免了因过度使用而引起的损耗和生产中断。这种预测还有助于延长刀具的使用寿命,进一步提高生产线的连续性和稳定性。

3.2.2 刀具材料与几何形状的优化

数字孪生技术提供了一个虚拟实验室,允许工程师在数字环境中进行大规模的刀具设计优化。模型可以模拟不同材料和几何参数的组合,预测不同设计方案在切削过程中的性能表现,包括刀片材料的选择、刃角的设定以及刃部形状的优化等方面。通过数字孪生模型的帮助,工程师可以快速找到最佳

的刀具设计,以实现更高效、更精确的切削过程。这不仅有助于降低能量消耗和热损失,还能减少振动和噪声,提高切削过程的稳定性。

3.3 数字孪生技术在工件夹持中的应用

3.3.1 优化夹具设计与选择

数字孪生模型可用于夹具设计的优化。通过模拟不同夹具设计的性能,包括夹持力分布、工件变形等,模型可以预测不同夹具方案对工件的影响。这种优化包括夹具的夹持点布局、夹具材料的选择、夹具形状的设计等。例如,对于某种工件形状和材料,模型可以推荐最佳的夹持点位置和夹具形状,以最大程度地减少工件的变形风险。这种个性化的夹持方案不仅有助于提高加工精度,降低废品率,还能优化生产效率,适应各种不同的工件形状和材料。

3.3.2 实时监测夹持状态与变形

数字孪生技术的另一个重要应用是实时监测工件夹持状态和变形情况。传感器可以安装在夹具上,以监测夹持点的力和位移等数据。然后将这些数据反映到数字孪生模型中,用于实时预测工件的变形情况。如果模型检测到夹持状态异常或工件变形的风险,它可以发出警报或建议工程师采取纠正措施,如重新调整夹持点位置或夹具的紧固力^[3]。这种实时监测和反馈机制不仅有助于防止工件变形引起的质量问题,提高加工的可控性和稳定性,还有助于减少生产中断,降低成本,提高生产效率,从而确保工件加工过程的顺利进行。

4 数字孪生技术的优势与挑战

4.1 优势

(1) 提高效率。数字孪生技术通过实时监测、模拟和优化物理系统,使生产过程更加智能和自适应。这有助于提高生产效率,降低能耗,减少生产周期,以满足市场需求的快速变化。工程师可以通过数字孪生模型迅速调整工艺参数,提高生产线的利用率,最大程度地减少生产中断。

(2) 降低成本。数字孪生技术有助于多方面降低制造成本:首先,它减少了设备维护成本,通过实时监测和预测设备状态,可以预防故障,减少不必要的维修;其次,数字孪生模型可以优化原材料的使用,降低资源浪费;最后,它还有助于减少废品率和重新加工的需求,降低生产过程中的损失。

(3) 减少资源浪费。数字孪生技术通过最大程度地优化生产过程,减少了能源、原材料和人力资源的浪费。它有助于精确控制生产,减少二次加工,降低废品率,从而降低资源消耗。此外,通过数字孪生模型的预测和优化,企业可以更好地计划和管理资源,避免过量生产,减少不必要的库存。

4.2 面临的挑战

(1) 模型精度。数字孪生模型的准确性对于其成功应用至关重要。建立准确的模型需要大量的数据和精确的物理参数。此外,模型的复杂性和计算成本可能会增加。数字孪生模型的高精度需要不断验证和改进,以准确反映物理系统的行为。

(2) 数据安全与隐私。数字孪生技术涉及大量的数据采集和处理,因此数据的安全性和隐私保护是一个重要挑战。泄露敏感数据或模型可能会导致知识产权问题或安全漏洞。应对这一挑战需要制定严格的数据保护和访问政策,以确保数据的安全。

(3) 硬件要求。实施数字孪生技术通常需要高性能计算设备和大规模数据存储系统,这可能会对企业的硬件基础设施提出了挑战,尤其是对于中小型企业来说,维护和升级这些硬件系统需要额外的投入。

5 结语

数字孪生技术不仅提高了生产效率、降低了成本,还减少了资源浪费,减轻对环境的影响。然而,数字孪生技术在模型精度、数据安全和硬件要求等方面仍然面临诸多挑战。为更好地应对这些挑战,将数字孪生技术推向更广泛的应用领域,需要不断地研究和创新,以及跨学科合作。

参考文献:

- [1] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
- [2] 于勇,胡德雨,戴晟,等.数字孪生在工艺设计中的应用探讨[J].航空制造技术,2018,61(18):26-33.
- [3] 李欣,刘秀,万欣欣.数字孪生应用及安全发展综述[J].系统仿真学报,2019,31(3):385-392.

作者简介:孙誉宾(1982.05-),男,汉族,河北唐山人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:机械加工。