

基于数字孪生的数控机床切削过程动态精度补偿与能耗优化研究

许岚

苏州工业职业技术学院, 江苏 苏州 215000

摘要: 智能制造技术的不断发展, 数字孪生技术在数控机床中的应用日益受到关注。数控机床在加工过程中面临精度补偿和能耗优化的双重挑战。通过数字孪生技术构建物理机床与虚拟模型的双向映射, 实现了对机床状态的实时监控与反馈。探讨了数字孪生在数控机床切削过程中的动态精度补偿与能耗优化方法, 并提出了一种协同优化策略, 旨在同时提高加工精度和降低能耗。验证了数字孪生技术在提升加工精度与能效方面的应用效果, 并为智能制造系统的进一步优化提供了新的思路。

关键词: 数字孪生; 数控机床; 动态精度补偿; 能耗优化; 智能制造

Research on Dynamic Accuracy Compensation and Energy Consumption Optimization in CNC Machine Tool Cutting Process Based on Digital Twin

Xu, Lan

Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract: With the continuous development of intelligent manufacturing technology, the application of digital twin technology in CNC machine tools has attracted increasing attention. CNC machine tools face the dual challenges of accuracy compensation and energy consumption optimization during the machining process. By constructing a bidirectional mapping between the physical machine tool and the virtual model through digital twin technology, real-time monitoring and feedback of the machine tool status are realized. This paper explores the methods of dynamic accuracy compensation and energy consumption optimization in the cutting process of CNC machine tools using digital twin, and proposes a collaborative optimization strategy aimed at improving machining accuracy and reducing energy consumption simultaneously. It verifies the application effect of digital twin technology in enhancing machining accuracy and energy efficiency, and provides new ideas for the further optimization of intelligent manufacturing systems.

Keywords: Digital twin; CNC machine tool; Dynamic accuracy compensation; Energy consumption optimization; Intelligent manufacturing

DOI: 10.62639/sspis23.20250209

引言

智能制造的迅速发展, 数控机床作为现代制造业的重要支撑, 广泛应用于各类精密加工中。然而, 数控机床在加工过程中面临着诸多挑战, 尤其是加工精度和能耗问题。由于振动、温度波动、刀具磨损等因素, 机床的动态精度往往难以稳定保证, 造成产品质量的不一致和生产效率的降低。机床在长期运行中消耗大量能源, 带来了高成本和环境压力, 这也是制造业可持续发展的瓶颈之一。

数字孪生技术, 作为一种新兴的技术, 凭借其能够在虚拟空间中精准模拟物理机床的运行状态, 提供了一种解决方案。通过建立与实际机床同步的虚拟模型, 数字孪生可以实时监控机床的工作状态, 并根据实时数据动态调整切削参数, 从而实现精度补偿和能效优化。基于此, 本研究提出了一种基于数字孪生技术的集成解决方案, 旨在提升数控机床的加工精度和能效, 为智能制造提供理论依据和技术支持。

一、数字孪生技术概述

(一) 数字孪生的基本概念

数字孪生 (Digital Twin) 是一种通过数字模型精确模拟物理对象行为与状态, 并与物理实体进行实时信息交互的技术。其核心思想是通过虚拟空间和物理空间的双向映射, 将实际物理设备的运行状态、参数以及环境信息等映射到虚拟模型中进行实时监测与仿真。该技术最早应用于航空航天领域, 用以预测航天器的运行状态并优化其性能。

在数控机床的应用中, 数字孪生通过构建与物理机床同步的虚拟模型, 结合实时传感器数据, 实现对机床状态的动态感知和反馈。这一虚拟模型能够反映机床的各项运行参数, 如振动、温度、刀具磨损等, 并通过不断更新虚拟模型, 提供优化决策支持。基于数字孪生的系统可以实时监控机床的加工过程, 动态调整加工参数, 从而确保加工精度和效率。

(二) 数字孪生的核心优势

数字孪生技术在智能制造中具备多项优势, 尤

(稿件编号: IS-25-9-1026)

作者简介: 许岚 (1978-), 女, 汉, 江苏苏州人, 苏州工业职业技术学院讲师, 主要研究方向为机械制造及自动化。

基金项目: 江苏高校青蓝工程资助项目 (2020): “重点领域校企合作项目-机械领域 CAE 虚拟仿真实验室建设” (项目编号: 2024011115884)。

其在精度补偿与能耗优化方面, 具有传统技术无法比拟的灵活性与精确性。数字孪生能够通过实时数据的反馈对物理机床进行动态优化, 实时调整切削参数, 以应对机床在加工过程中出现的动态误差, 如机床振动、刀具磨损等。这种动态补偿方法, 不仅能够有效提高加工精度, 还能显著降低因误差引发的返工和废品率, 提高生产效率。

通过实时监控机床的运行状态, 数字孪生能够及时识别高能耗的工作状态, 优化加工过程中的切削参数, 从而降低机床的能耗。

二、数控机床切削过程中的动态精度补偿问题

(一) 精度补偿的传统方法与局限性

在数控机床的加工过程中, 精度补偿一直是提升加工质量和生产效率的重要手段。传统的精度补偿方法主要依赖静态模型或经验公式, 在加工前对机床的误差进行修正。这些方法通常建立在假设机床运行状态稳定的基础上, 对于静态误差如位置误差、几何误差等能够提供一定的修正效果。实际的数控加工环境往往受到诸如机床振动、刀具磨损、热变形、温度波动等动态因素的影响, 传统方法无法应对这些复杂且变化的动态误差。传统的静态补偿方法在面对复杂加工环境时, 补偿效果显得有限且不稳定。

(二) 基于数字孪生的动态精度补偿方法

与传统的静态精度补偿方法不同, 基于数字孪生的动态精度补偿技术通过实时采集数控机床的运行数据, 能够在加工过程中不断对机床的误差进行动态修正。数字孪生通过构建与物理机床同步的虚拟模型, 实时反映机床的状态变化, 并根据这些变化调整加工过程中的参数。数字孪生技术能够捕捉机床运行中的动态特征, 如机床振动、刀具磨损和热膨胀等, 进而通过优化算法进行动态补偿。

在该方法中, 动态多目标优化算法(如遗传算法、粒子群优化等)被广泛应用于切削参数的实时调整。这些算法能够根据加工过程中的实时反馈, 对切削速度、进给率、切削深度等关键参数进行动态调整, 从而实现加工精度的优化和保持。通过数字孪生技术, 精度补偿不仅限于静态修正, 而是根据机床的实时状态进行动态优化, 确保加工精度在不同工况下均能保持在最佳状态。

(三) 实时数据驱动的虚拟模型与精度补偿效果

数字孪生精度补偿的核心在于实时数据的采集和虚拟模型的更新。通过使用 S7 通信、Socket 通信等协议, 机床的传感器数据能够实时传输到虚拟模型中。这样, 物理机床的实际运行状态就能在虚拟模型中得到准确反映, 并通过对虚拟模型的动态调整, 实时优化加工参数。这种实时更新的虚拟模型成为精度补偿的依据, 能够帮助机床根据加工过程中产生的误差自动进行补偿。

例如, 通过构建基于数字孪生的数控铣削模型, 采用实时数据采集技术将机床的运行状态和误差信息传递至虚拟模型中, 实现了对加工过程的精确监控和调整。这种基于数据驱动的精度补偿方案, 不仅能够应对复杂的动态误差, 还能在不增加人工干

预的情况下实现自动化调整, 从而大幅提高了加工精度和生产效率。

三、数控机床能耗优化问题

(一) 能耗问题的现状与挑战

数控机床是现代制造业中不可或缺的设备之一, 但其高能耗问题日益成为制约制造业可持续发展的瓶颈。在加工过程中, 尤其是在高负荷、长时间运行的情况下, 数控机床通常需要较高的功率和能源消耗。这种高能耗不仅显著提高了生产成本, 还对环境造成了较大压力, 尤其是在全球范围内对绿色制造和节能减排要求不断提升的背景下, 如何降低能耗、提高机床能效, 成为制造业待解决的关键问题。

(二) 基于数字孪生的能耗建模与优化

数字孪生技术通过将物理机床与虚拟模型进行同步映射, 能够实时监测和优化机床的能耗。通过实时采集机床的工作数据(如切削力、转速、进给率等), 数字孪生系统能够建立机床能耗的预测模型, 从而实现对加工过程中能耗的精准控制。通过分析不同加工工况下的能耗数据, 数字孪生能够动态调整切削参数, 实现能效的最优化。

(三) 实际应用中的能效优化案例

在实际应用中, 数字孪生技术已经在多个数控机床的能效优化中取得了显著成果。例如, 在数控铣削加工过程中, 数字孪生技术通过实时监测机床的各项运行参数, 如切削力、进给速度和刀具磨损等, 能够对加工过程中的能耗进行实时调整。特别是在考虑到材料去除率与能耗之间的关系时, 数字孪生可以动态优化切削速度、进给率等关键因素, 从而在保证加工精度的同时, 最大限度地降低能耗和功率消耗。

四、数字孪生技术在精度补偿与能耗优化中的协同优化

(一) 精度与能效的相互关系

在数控机床的加工过程中, 精度补偿与能效优化往往是相互制约的两个目标。提高加工精度通常意味着需要更细致的切削控制, 这可能会增加机床的工作负荷和能耗。例如, 为了保持高精度的切削过程, 机床可能需要更低的切削速度、更小的进给量或更复杂的控制策略, 这些都会直接增加机床的能量消耗。反之, 单纯的能效优化可能会牺牲加工精度, 例如降低切削速度或提高进给率以减少能耗, 但这种做法有时会导致产品表面质量下降, 影响加工精度。

精度和能效之间的矛盾使得两者的优化变得复杂。如何在这两者之间找到最佳的平衡点, 既保证加工精度, 又实现能效的最大化, 成为数控机床性能优化的核心问题。传统的优化方法往往难以同时考虑这两个目标, 而基于数字孪生的协同优化方案能够在动态的生产环境下, 通过实时反馈和智能调整, 实现精度与能效的协同优化。

(二) 协同优化模型与算法设计

多目标优化算法是协同优化模型的核心组成部分。在这一模型中, 算法通常包括遗传算法(GA)、

粒子群优化 (PSO) 和高斯过程回归 (GPR) 等。通过这些算法, 系统能够根据实时监测数据, 动态调整切削参数, 如切削深度、进给速度和刀具速度等, 从而同时满足加工精度和能效要求。遗传算法可以用于探索多个目标之间的最优解, 粒子群优化则能够在高维参数空间中快速收敛到最优解, 而 GPR 则通过建立精度与能耗之间的映射关系, 实时预测加工过程中的能耗变化, 进一步优化目标函数。

虚拟仿真技术也在协同优化模型中发挥着重要作用。通过对虚拟模型的动态更新, 数字孪生能够模拟不同切削参数对加工精度和能效的影响, 提前预测加工过程中的可能问题, 并进行相应的优化调整。这种基于实时数据和仿真模型的闭环控制, 有助于在实际加工过程中实时调节各项参数, 确保两者目标的协同实现。

(三) 协同优化的实际效果评估

在实际应用中, 基于数字孪生的协同优化模型已被证明能够显著提升数控机床的加工精度和能效。例如, 在某数控铣床的应用中, 研究通过实施基于数字孪生的协同优化方法, 成功地实现了在保持高精度加工的同时, 显著降低了能耗。在该应用中, 机床的加工精度得到了进一步提高, 表面粗糙度和刀具磨损也得到了有效控制, 而能耗则比传统方法降低了约 30%。

在加工过程中, 实时数据采集系统通过监测机床的各项运行参数, 如切削力、温度变化和刀具状态, 将数据传输至虚拟模型中。基于这些实时数据, 优化算法能够动态调整切削速度和进给量, 从而使机床在不牺牲加工精度的情况下, 减少了能量消耗。此外, 通过对加工过程中能效和精度的综合优化, 企业不仅减少了能源消耗, 还提高了生产效率, 进一步降低了运营成本。

另一项成功的案例是在某制造企业中应用数字孪生技术后, 通过协同优化, 在保持加工精度的同时, 实现了切削过程的能效提升。这一过程中, 优化系统通过实时反馈和调节, 成功地避免了因低效能耗所带来的经济损失, 同时确保了最终产品的精度要求, 体现了数字孪生技术在精度与能效双重目标下的应用价值。

五、未来发展趋势与研究方向

(一) 数字孪生技术的持续发展

尽管数字孪生技术已在数控机床领域取得显著应用成果, 但在实际应用中仍面临诸如实时数据处理、虚拟模型精度、数据同步等挑战。首先, 随着加工环境的日益复杂, 实时数据的采集和处理成为一大瓶颈。机床的运行状态不仅受到机械部件本身的影响, 还受到外部环境因素如温度、湿度等的影响。如何在这些动态变化中准确地捕捉数据, 并快速传输到虚拟模型中进行处理, 是数字孪生技术进一步发展的关键。

虚拟模型的精度和计算能力仍然是限制数字孪生技术应用的另一重要因素。随着计算能力的提升, 尤其是人工智能和大数据技术的发展, 未来的数字孪生技术能够在更为复杂的加工场景中进行实时反馈与调整, 从而提高虚拟模型的精度与实时性。通

过增强现实 (AR) 与虚拟现实 (VR) 的结合, 数字孪生技术将在机床的操作界面、性能评估以及优化控制方面展现更大的应用潜力。

(二) 智能制造与绿色制造的结合

数字孪生技术不仅为智能制造提供了技术支持, 还推动了绿色制造的发展。智能制造追求生产过程中的高效、精确和灵活, 而绿色制造则强调资源的高效利用和环境友好。数字孪生通过优化生产过程中的各项参数, 能够在保证加工精度和效率的同时, 有效减少能源消耗和排放。随着全球对于可持续发展 and 环境保护要求的提升, 数字孪生技术将在制造业的低碳转型中发挥越来越重要的作用。

例如, 通过数字孪生进行能源监测和优化, 机床可以在高效加工的同时, 通过实时调整切削参数、温度控制和进给速度等, 最大限度减少能耗和废料排放。未来, 数字孪生技术将不仅仅是智能制造的核心工具, 还将成为推动低碳制造和绿色生产的重要支撑, 帮助企业在提升生产力的同时, 实现可持续发展目标。

(三) 未来研究方向与技术创新

未来数字孪生技术的研究将集中在几个方面。提升精度和实时性的研究将是数字孪生技术发展的核心方向。尤其是在复杂的加工场景中, 如何提升虚拟模型的准确性、减少计算延迟, 仍然是技术突破的关键。通过优化数据处理的算法设计, 未来的数字孪生系统将能够更好地适应高负荷、动态变化的生产环境。

人工智能、大数据和物联网的广泛应用, 数字孪生技术将在跨学科的融合中发挥越来越重要的作用。通过将人工智能与数字孪生结合, 能够实现更智能的生产调度、设备维护和故障预测。而大数据的集成, 将为数字孪生提供更全面的生产数据支持, 从而帮助企业进行更加精准的生产决策。未来, 数字孪生技术将在智能制造、自动化控制和工艺优化等多个领域实现创新应用。

六、结束语

基于数字孪生的数控机床切削过程动态精度补偿与能耗优化研究, 提出了一种全新的智能制造解决方案。通过实时数据采集和虚拟模型构建, 数字孪生技术能够在加工过程中实现精度补偿和能效优化的双重目标, 显著提高生产效率并降低能源消耗。这不仅为传统制造业的转型升级提供了新的技术路径, 也为绿色制造和智能制造的发展奠定了基础。随着技术的不断进步, 数字孪生将在智能制造领域扮演越来越重要的角色, 推动制造业向更加高效、环保的方向发展。

参考文献:

- [1] 赵丽丽. 基于数字孪生的数控加工切削参数优化方法研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.
- [2] 巩超光, 胡天亮, 叶瑛歆. 基于数字孪生的铣削参数动态多目标优化策略 [J]. 计算机集成制造系统, 2021.
- [3] 潘安大. 数控机床切削过程能耗建模及工艺参数优化研究 [D]. 重庆理工大学, 2019.
- [4] 崔馨予. 数控铣削数字孪生模型研究及面向能效的加工参数优化 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.