

实时切削条件监测与自适应调整在数控加工中的实现

朱小龙

中车大同电力机车有限公司 山西大同 037038

摘要: 随着制造业的不断发展, 数控加工技术已成为现代工业的重要组成部分。传统的数控加工往往依赖于经验和固定的切削参数, 难以应对复杂工况的变化。实时切削条件监测与自适应调整技术的出现, 为提升加工精度和效率提供了新的解决方案。通过实时监测切削力、温度等关键参数, 能够及时识别潜在问题, 并通过自适应控制策略进行动态调整, 确保加工过程的稳定性和一致性。本文旨在探讨实时监测与自适应调整技术在数控加工中的实现方法及其应用效果, 以期为智能制造的发展提供理论支持和实践参考。

关键词: 实时切削条件监测; 自适应调整; 数控加工

引言

在现代制造业中, 数控加工技术因其高精度和高效率而广泛应用。然而, 随着加工复杂性和材料多样性的增加, 传统的切削参数设置方法已显得不足, 无法灵活应对实际生产中的各种变化。切削过程中的温度、力等动态变化常常影响工件的质量和加工效率, 导致刀具磨损加剧、工件精度下降等问题。因此, 实时切削条件的监测显得尤为重要。通过实时获取切削状态信息, 能够及时识别潜在的加工异常, 从而采取相应措施进行调整。自适应调整技术的引入, 可以根据监测到的数据智能化优化切削参数, 实现加工过程的自我调节, 进而提升整体加工效率和产品质量。综上所述, 实时监测与自适应调整技术的研究, 不仅为数控加工带来了新的机遇, 也为推动智能制造的发展奠定了基础。

一、数控加工中实时切削条件监测策略

(一) 基于切削力监测的实时切削条件调整策略

1.1 切削力传感器与数据采集系统的配置

切削力是反映刀具与工件之间相互作用的一个关键物理量。为了能够实时监测切削力, 数控加工设备通常需要安装高灵敏度的切削力传感器。这些传感器往往采用应变片或者压电材料, 能够快速响应切削过程中微小的力变化。与之配套的, 是高速数据采集系统, 该系统必须具备极低的延迟和足够的采样率, 确保采集到的切

削力数据可以实时反映切削条件的变化, 同时对过程进行实时的监测(如图1所示)。在配置过程中, 必须根据加工任务选择合适的传感器灵敏度和数据采集频率, 通常情况下, 数据采集的频率至少要比刀具主轴的转速快10倍以上, 才能获得足够精度的数据。

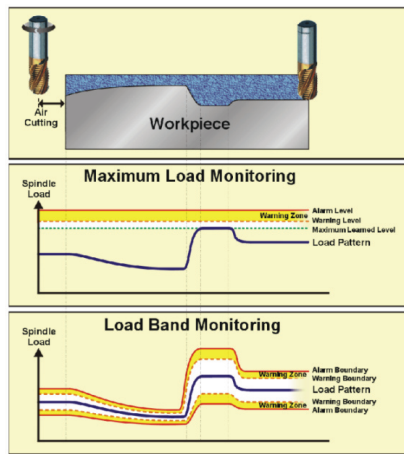


图1 过程监测界面

1.2 实时监控切削力的阈值设定与自动报警

切削力的变化可以有效地反映刀具的磨损情况和加工条件的恶化。当切削力超过某一预设的阈值, 可能意味着刀具已经磨损严重, 或者切削参数不再适合当前的加工环境。因此, 在实时切削力监测系统中, 必须设定切削力的安全阈值。这个阈值的设定需要根据不同的材料、切削条件、刀具类型等因素进行调整。通过历史数据的积累, 可以建立模型预测正常的切削力范围。一旦监测到超出阈值的力值, 系统可以通过报警提示操作人员, 或者直接触发自动调整切削参数(如降低进给速度、减少切削深度等), 以避免刀具或工件的损坏。

作者简介: 朱小龙(1986.10——), 男, 汉族, 吉林公主岭人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事机械加工(冷加工)方面的研究工作。

(二) 基于声发射监测的刀具状态检测策略

2.1 声发射传感器的安装位置及信号传输路径设计

声发射技术是通过监测材料内部产生的声波来评估加工状态的一种非侵入式方法。在数控加工中，声发射传感器通常安装在刀柄或工件的夹具上，以确保能够清晰地捕捉到刀具与工件接触时产生的高频信号。由于声发射信号容易受到噪声和振动的干扰，因此传感器安装位置的设计尤为重要。必须尽量避开振动源，并使用适当的隔震措施。此外，信号传输路径应尽可能短，以减少信号的衰减和干扰。光纤传输技术在一些高精度加工场合得到了应用，因为它可以有效避免电磁干扰，保证信号传输的稳定性。

2.2 多源数据融合与刀具寿命预测模型

单一的声发射信号虽然能够反映刀具的某些状态，但其精度和可靠性可能不够。因此，近年来兴起了多源数据融合技术，即将声发射信号与其他信号（如切削力、振动、温度等）结合起来，形成更加全面的刀具状态监测体系。例如，切削力的增加可能预示着刀具磨损，但结合声发射信号的变化，系统可以更加准确地判断刀具的磨损程度。通过机器学习算法，基于多源数据构建刀具寿命预测模型，可以在加工过程中实时调整切削条件，最大化刀具的利用率，同时避免因刀具失效造成的质量问题 and 停机损失。

(三) 基于切削温度监测的热效应控制策略

3.1 热电偶和红外测温技术的结合应用

切削温度是影响刀具寿命和加工质量的另一个重要因素。在数控加工过程中，切削产生的热量不仅会导致刀具磨损加速，还可能引发工件的热变形。因此，实时监测切削温度是实现高效加工的关键策略之一。常用的温度监测手段包括热电偶和红外测温技术。热电偶能够直接接触刀具或工件，获取局部的温度变化数据，但其反应速度相对较慢。而红外测温技术可以非接触地监测温度，响应速度快，但其测量的精度可能会受到表面反射率和环境温度的影响。在实际应用中，通常将两种技术结合使用，以获得准确且快速的温度数据。通过在刀具附近安装热电偶，并在加工区域安装红外测温仪，能够形成全面的温度监测网络。

3.2 温度与切削参数的动态调整模型

在加工过程中，切削温度与切削参数（如进给速度、主轴转速、切削深度）密切相关。通过实时监测温度，可以建立温度与切削参数之间的动态模型。例如，当监测到温度过高时，系统可以自动减少切削深度或降低进

给速度，避免刀具的过热失效。此外，温度监测数据可以与材料的热物理性能结合起来，预测工件在加工过程中的热变形趋势。通过有限元分析（FEA）等技术，可以对温度场进行建模，并根据模型调整加工策略，从而确保工件的加工精度。

二、数控加工中实时切削自适应调整方法分析

(一) 基于自适应控制的切削参数动态调整技术

1.1 自适应控制系统的闭环结构与参数反馈

在数控加工过程中，自适应控制系统是用于实现实时切削参数动态调整的核心。其基本结构是一个闭环控制系统，系统通过传感器实时监测加工过程中的切削力、振动、温度等参数，并将这些参数反馈至控制器。在自适应控制系统中，动态调整切削参数的过程可以用以下公式表示：

$$\Delta P = K_f \cdot (P_{set} - P_{measured})$$

其中：

ΔP 表示需要调整的切削参数（如进给速度或主轴转速的变化量）。

K_f 是控制增益，反映了系统对误差的敏感度。

P_{set} 是预设的目标参数（如理想切削力）。

$P_{measured}$ 是通过传感器实时监测到的实际参数（如当前切削力）。

该公式反映了控制器如何根据反馈的参数差异（误差）来调整切削参数，以实现自适应控制的目的。控制器根据反馈信息与预设的加工模型进行比对，识别出加工条件的变化，进而动态调整切削参数以维持最佳加工状态。例如，当切削力超出设定范围时，系统会自动降低进给速度或调整主轴转速。该闭环结构的关键在于反馈的及时性与控制器响应速度，通常，系统的响应时间要求在毫秒级别，以保证调整能够与实际加工过程同步。

1.2 切削参数的自适应优化算法设计

自适应控制系统的核心在于其算法设计。在切削参数的自适应优化算法中，可以用以下公式表示切削参数的优化过程：

$$P_{optimal} = f(P_{current}, \Delta P, C)$$

其中：

$P_{optimal}$ 是经过优化后的切削参数（如切削速度、进给率或切削深度）。

$P_{current}$ 是当前监测到的切削参数。

ΔP 是根据反馈信息计算出的调整量。

C 是表示加工条件的环境变量（如材料特性、刀具状态等）。

公式强调了在不同加工条件下，如何通过实时反馈和优化算法动态调整切削参数，以实现最佳加工效果。针对不同的加工材料和工艺要求，优化算法需要能够根据实时监测的切削参数动态调整切削速度、进给率和切削深度等关键参数。常见的算法包括模糊逻辑控制、神经网络和遗传算法等。模糊逻辑控制通过将加工过程中的模糊信息（如刀具磨损程度）转化为具体的控制指令，适用于参数波动较大的复杂加工环境。而神经网络则能够通过训练学习大量的历史数据，自动识别出不同加工条件下的最佳切削参数，尤其适合在刀具磨损严重时及时调整加工参数，以延长刀具寿命。遗传算法则通过模拟生物进化过程，在加工过程中不断进行参数组合的优化，从而寻找出最优的切削条件。

（二）基于刀具磨损状态的自适应进给率调整技术

2.1 刀具磨损的实时监测与反馈机制

刀具磨损是影响加工质量与效率的重要因素之一，因此在数控加工中，实时监测刀具的磨损状态至关重要。刀具磨损的监测可以通过多种传感技术实现，如切削力传感器、声发射传感器和振动传感器等。当传感器检测到刀具磨损的信号（如切削力显著上升或声发射信号的异常变化），这些信号会被反馈到数控系统中。系统根据反馈的磨损状态，结合预先设定的磨损模型，自动调整进给率。通过这种方式，系统可以在刀具即将达到其极限磨损状态之前调整切削参数，避免加工过程中出现过磨磨损而导致的工件表面质量下降或刀具断裂。

2.2 基于磨损状态的进给率自适应调整方法

刀具磨损会导致切削力逐渐增加，从而影响加工精度和效率。因此，在实际加工过程中，自适应调整进给率是应对刀具磨损的有效方法。当监测系统检测到刀具磨损状态发生变化时，系统会根据磨损程度调整进给率。通常情况下，随着刀具磨损程度的加剧，系统会逐步降低进给率，以减轻刀具的切削负荷。例如，在高速加工硬质材料时，当刀具的切削刃逐渐钝化，切削力上升的同时，系统可以降低进给速度，从而延长刀具的使用寿命。此外，进给率的调整需要考虑加工材料的硬度、工件的几何形状以及切削深度等因素，系统通过自适应算法对这些参数进行优化，以确保加工过程的稳定性和高效性。

（三）基于振动监测的自适应主轴转速调整策略

3.1 振动信号采集与实时分析

振动是影响数控加工精度和刀具寿命的关键因素之一。在高精度加工中，振动信号的监测与分析至关重要。通常，振动传感器被安装在主轴或工件夹具上，用于捕

捉加工过程中的振动数据。振动信号的采集频率应足够高，以捕捉到主轴旋转过程中微小的振动变化。通过傅里叶变换等频域分析方法，系统可以识别出振动信号中的频率成分，尤其是那些与主轴共振频率相关的部分。一旦检测到振动信号的异常波动，系统将实时评估振动对加工精度和刀具寿命的潜在影响，并根据振动信号的强度和频率变化，采取相应的调整措施。

3.2 振动与主轴转速的相互影响机制

振动与主轴转速之间存在复杂的相互影响机制。当主轴转速接近某些特定的共振频率时，振动幅度会显著增加，从而影响加工精度和刀具寿命。因此，在数控加工过程中，自适应调整主轴转速可以有效避免共振现象。具体而言，系统通过实时分析振动信号中的频率成分，当发现主轴转速与某一共振频率接近时，系统会自动调整主轴转速，使其远离该共振频率。例如，在高转速加工中，系统可以通过小幅度提升或降低主轴转速，避免主轴与工件或刀具发生共振，从而确保加工过程的平稳进行。振动与主轴转速的关系通常表现为非线性，因此调整策略需要通过实时监测与分析进行动态优化。

结语

在数控加工过程中，实时切削条件的自适应调整技术对于提高加工效率、保证工件质量以及延长刀具寿命至关重要。通过基于切削力、刀具磨损、振动等关键参数的监测与反馈，现代数控设备能够实现自动化的切削参数动态调整。这不仅减少了人为干预的复杂性，还提高了加工过程的精度与稳定性。切削力与振动信号的实时分析、进给率与主轴转速的智能调整以及刀具状态的动态反馈，都是自适应控制技术中的核心环节。未来，随着人工智能与大数据技术的进一步发展，自适应控制方法将在数控加工中展现更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 高远, 凌丽, 叶正茂, 等. 实时监测切削力的分体式智能刀柄设计与切削测试[J]. 工具技术, 2024, 58(5): 147-151. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2024.05.028.
- [2] 李俊娴, 张辽远. 含能材料切削过程高精度检测系统设计[J]. 一重技术, 2024(1): 54-57. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3355.2024.01.17.
- [3] 黄玖. 普通车床高速切削加工振动问题研究[J]. 设备管理与维修, 2024(6): 153-155. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2024.03D.51.