

机械加工中的刀具磨损监测与寿命预测方法研究

王 威 金彦霖 王伊涛

一拖（洛阳）柴油机有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要：本文聚焦于机械加工领域中刀具磨损监测与寿命预测这一关键问题。首先阐述了刀具磨损对机械加工的重要性，分析传统监测与预测方法的局限性。接着详细探讨了多种先进的刀具磨损监测技术，包括直接监测法与间接监测法，并分析其原理、优缺点及适用场景。在寿命预测方面，介绍了基于物理模型、数据驱动以及混合模型的预测方法。最后对刀具磨损监测与寿命预测方法的未来发展趋势进行展望，旨在为提高机械加工效率与质量提供理论支持与实践指导。

关键词：机械加工；刀具磨损监测；寿命预测；先进技术

1 引言

机械加工中，刀具是切削关键部件，其性能影响整个加工进程。刀具持续切削会磨损，磨损加剧会使切削性能下降，影响工件质量、精度与效率，严重磨损还可能引发机床振动、刀具破损，造成经济损失与安全隐患。传统刀具磨损监测与寿命预测靠人工经验与定期更换，人工判断主观性强、准确性低，难发现早期磨损；定期更换保守，易致刀具过度使用或过早更换，增加成本。所以，研究准确高效的方法对实现机械加工智能化、自动化与高效化意义重大。

2 刀具磨损机理与影响因素

2.1 刀具磨损机理

刀具磨损是复杂物理化学过程，主要有磨粒、粘结、扩散、氧化及热电磨损。磨粒磨损是硬质点或切屑微粒划擦刀具表面致材料去除；粘结磨损是刀具与工件局部高温高压粘结，相对运动时粘结点撕裂使刀具材料转移；扩散磨损是高温下原子扩散改变刀具表面成分与结构，降低硬度和耐磨性；氧化磨损是刀具表面氧化膜反复生成与擦去致磨损；热电磨损是切削中温度差异产生热电势，促使原子迁移加速磨损。

2.2 刀具磨损影响因素

刀具磨损受刀具材料、工件材料、切削参数及切削环境综合影响。刀具材料性能影响抗磨损能力，如硬质合金比高速钢耐磨；工件材料硬度、强度等影响显著，加工高硬度、高强度材料磨损快；切削参数中，切削速度、进给量、背吃刀量越大，刀具磨损越严重；切削环境里，良好冷却润滑可降低温度、减少摩擦，减缓磨损。

3 传统刀具磨损监测与寿命预测方法及局限性

3.1 传统监测方法

传统的刀具磨损监测方法主要包括人工观察法与切

削力监测法。人工观察法是操作人员通过肉眼或借助显微镜直接观察刀具的磨损状态，如后刀面磨损带宽度、月牙洼深度等。这种方法简单直观，但需要停机进行观察，影响加工效率，且主观性强，准确性受操作人员经验与技能水平限制^[1]。切削力监测法是通过安装在机床上的测力仪测量切削过程中的切削力信号，当刀具磨损时，切削力会发生变化，根据切削力的变化情况来判断刀具磨损程度。然而，切削力信号容易受到切削参数、工件材料不均匀性等因素的干扰，导致监测结果不准确。

3.2 传统寿命预测方法

传统的刀具寿命预测方法主要基于刀具制造商提供的刀具寿命试验数据，结合加工过程中的切削参数进行经验公式计算。例如，泰勒公式是常用的刀具寿命预测公式，其表达式为 $VT^n = C$ ，其中 V 为切削速度， T 为刀具寿命， n 和 C 为与刀具材料、工件材料等相关的常数。这种方法简单易行，但忽略了实际加工过程中众多复杂因素对刀具寿命的影响，如刀具磨损的动态变化、切削环境的波动等，导致预测结果与实际刀具寿命存在较大偏差。

3.3 局限性分析

传统刀具磨损监测与寿命预测方法存在明显的局限性。在监测方面，人工观察法效率低下且准确性差，切削力监测法抗干扰能力弱；在寿命预测方面，经验公式法过于简化，无法准确反映实际加工条件下的刀具磨损规律。这些局限性使得传统方法难以满足现代机械加工对高精度、高效率、高质量的要求，迫切需要研究更加先进、准确的监测与预测方法。

4 先进刀具磨损监测方法

4.1 直接监测法

4.1.1 光学监测法

光学监测法利用光学原理对刀具表面进行成像，通

过分析刀具表面的图像特征来监测刀具磨损。常见的光学监测方法包括激光位移传感器法、机器视觉法等。激光位移传感器法通过发射激光束到刀具表面,测量反射光的位置变化来获取刀具表面的轮廓信息,从而计算出刀具的磨损量。该方法具有测量精度高、响应速度快等优点,但设备成本较高,且对测量环境要求较为严格。机器视觉法则是利用摄像头采集刀具表面的图像,通过图像处理算法提取刀具磨损特征,如磨损区域的面积、形状等,进而判断刀具磨损状态。机器视觉法具有非接触、实时性强等优点,能够实现对刀具磨损的在线监测,但图像处理算法的复杂度较高,对光照条件、图像清晰度等因素较为敏感。

4.1.2 声发射监测法

声发射监测法是基于材料在受力变形或断裂过程中会产生弹性波的原理,通过安装在刀具附近的声发射传感器接收刀具磨损过程中产生的声发射信号,并对信号进行分析处理来监测刀具磨损。刀具磨损时,磨损部位的微裂纹扩展、材料剥落等过程会产生不同特征的声发射信号,不同磨损阶段对应的声发射信号特征也有所不同^[2]。通过对声发射信号的时域、频域特征进行分析,如信号的幅值、频率、能量等,可以判断刀具的磨损状态与磨损程度。声发射监测法具有灵敏度高、能够实时监测刀具磨损的动态过程等优点,但对传感器的安装位置与信号处理算法要求较高,容易受到周围环境噪声的干扰。

4.2 间接监测法

4.2.1 振动监测法

振动监测法是通过安装在机床上的振动传感器测量切削过程中的振动信号,由于刀具磨损会导致切削过程的稳定性发生变化,进而引起振动信号的特征改变,因此可以通过分析振动信号来间接监测刀具磨损。常用的振动信号特征参数包括振动幅值、频率、相位等,当刀具磨损加剧时,振动幅值通常会增大,振动频率成分也会发生变化。振动监测法具有信号获取方便、对传感器安装位置要求相对较低等优点,但振动信号容易受到机床本身的振动、切削参数变化等因素的干扰,需要采用合适的信号处理方法提取与刀具磨损相关的特征信息。

4.2.2 电流/功率监测法

电流/功率监测法是通过监测机床主轴电机或进给电机的电流或功率信号来间接判断刀具磨损状态。在切削过程中,刀具磨损会导致切削力增大,从而使电机的负载增加,电流或功率信号也会相应发生变化。通过建立电流/功率信号与刀具磨损之间的映射关系,可以根据实时监测到的电流/功率信号来预测刀具磨损程度。该方法

具有实现简单、成本低等优点,且电流/功率信号能够反映整个切削系统的负载情况,但同样容易受到电网电压波动、机床其他部件运行状态等因素的干扰,需要进行信号滤波与校准处理。

4.2.3 多传感器信息融合监测法

由于单一传感器监测方法往往存在一定的局限性,难以全面、准确地反映刀具磨损状态,因此多传感器信息融合监测法逐渐受到关注。该方法通过同时采集多种不同类型的传感器信号,如振动信号、声发射信号、电流信号等,并利用信息融合技术将这些信号进行综合处理与分析,提取更能准确表征刀具磨损状态的特征信息^[3]。多传感器信息融合可以分为数据层融合、特征层融合与决策层融合三个层次,不同层次的融合方法具有不同的特点与适用场景。通过多传感器信息融合,可以充分发挥各种传感器信息的互补性,提高刀具磨损监测的准确性与可靠性。

5 刀具寿命预测方法

5.1 基于物理模型的预测方法

基于物理模型的预测方法是根据刀具磨损的物理机理,建立描述刀具磨损过程的数学模型,结合实际加工条件与刀具材料特性,通过求解模型来预测刀具寿命。常见的物理模型包括Archard磨损模型、Usui磨损模型等。Archard磨损模型基于磨粒磨损机理,认为刀具磨损体积与切削距离、法向力成正比,与刀具材料的硬度成反比,其表达式为 $V = k \frac{F_n L}{H}$,其中 V 为磨损体积, k 为磨损系数, F_n 为法向力, L 为切削距离, H 为刀具材料硬度。Usui磨损模型则考虑了切削温度对刀具磨损的影响,适用于高速切削等工况下的刀具寿命预测。基于物理模型的预测方法能够从本质上揭示刀具磨损的规律,但模型的建立需要准确掌握刀具磨损的物理机理与相关参数,实际应用中往往由于模型简化、参数难以准确获取等因素导致预测精度有限。

5.2 基于数据驱动的预测方法

5.2.1 人工神经网络预测法

人工神经网络(ANN)是一种模拟人脑神经元结构的计算模型,具有强大的非线性映射能力与自学习能力,能够处理复杂的非线性问题。在刀具寿命预测中,可以将切削参数、刀具材料特性、加工工况等作为输入变量,刀具寿命作为输出变量,利用大量的实验数据对神经网络进行训练,建立输入与输出之间的映射关系。训练好的神经网络模型可以根据实时输入的加工参数预测刀具寿命。常见的人工神经网络模型包括BP神经网络、径向基函数(RBF)神经网络等^[4]。人工神经网络预测法不需

要建立复杂的物理模型,能够适应不同加工条件下的刀具寿命预测,但需要大量的实验数据进行训练,且模型的泛化能力受到训练数据质量与数量的影响。

5.2.2 支持向量机预测法

支持向量机(SVM)是一种基于统计学习理论的机器学习方法,其基本思想是在特征空间中寻找一个最优超平面,使得不同类别的样本之间的间隔最大。在刀具寿命预测中,SVM可以将刀具寿命预测问题转化为一个分类或回归问题,通过构建合适的核函数将输入数据映射到高维特征空间,在高维空间中寻找最优决策函数进行预测。与人工神经网络相比,SVM具有更强的泛化能力,能够有效避免过学习问题,在小样本情况下也能取得较好的预测效果。但SVM的性能受到核函数选择与参数设置的影响较大,需要进行优化调整。

5.3 混合模型预测方法

为了充分发挥基于物理模型与基于数据驱动预测方法的优势,克服各自的局限性,混合模型预测方法逐渐成为研究热点。混合模型通常将物理模型与数据驱动模型相结合,利用物理模型提供的基本框架与先验知识,结合数据驱动模型对模型参数进行优化或对物理模型无法准确描述的部分进行补偿。例如,可以将基于物理模型的预测结果作为人工神经网络的输入之一,与其他加工参数一起训练神经网络,提高预测精度;或者利用支持向量机对物理模型中的磨损系数进行实时修正,使模型更好地适应实际加工条件的变化。混合模型预测方法能够综合利用物理信息与数据信息,提高刀具寿命预测的准确性与可靠性,但模型的构建与求解相对复杂,需要深入研究两种方法的融合方式与算法实现。

6 刀具磨损监测与寿命预测方法的未来发展趋势

6.1 智能化与自动化程度不断提高

随着人工智能、物联网、大数据等技术的快速发展,刀具磨损监测与寿命预测将朝着智能化与自动化方向迈进。未来的监测系统将具备自动采集、处理与分析传感器数据的能力,能够实时、准确地判断刀具磨损状态并预测剩余寿命,同时自动调整加工参数或发出更换刀具指令,实现加工过程的自适应控制。此外,通过物联网技术实现设备之间的互联互通,将刀具磨损监测与

寿命预测系统与企业生产管理系统集成,实现生产过程的智能化调度与优化。

6.2 多学科交叉融合加深

刀具磨损监测与寿命预测是一个涉及机械工程、材料科学、信号处理、人工智能等多学科交叉的领域。未来,各学科之间的交叉融合将更加深入,例如利用材料科学的新成果深入研究刀具磨损的微观机理,为建立更准确的物理模型提供基础;运用先进的信号处理技术与人工智能算法提高监测与预测的精度与效率。多学科的协同创新将推动刀具磨损监测与寿命预测技术不断取得新突破。

6.3 面向绿色制造的需求

在全球倡导绿色制造的背景下,刀具磨损监测与寿命预测技术也将更加注重节能减排与资源高效利用。通过准确预测刀具寿命,合理安排刀具更换时间,避免刀具的过度使用与过早更换,减少刀具消耗与废弃物产生;同时,优化加工参数,降低切削过程中的能耗与切削液使用量,实现机械加工的绿色、可持续发展。

结语

刀具磨损监测与寿命预测对机械加工至关重要,能提高质量、效率并降低成本。传统方法有局限,难满足现代需求。先进监测方法分直接与间接监测法,各有优劣与适用场景;寿命预测方法有物理、数据驱动及混合模型等,特点与准确性各异。实际应用案例显示,先进方法可带来显著经济效益。未来,随智能化等趋势发展,该技术将完善创新。企业应依自身特点选合适方法,探索新技术,提升竞争力与可持续发展能力。

参考文献

- [1]向福星,孟博洋,李众杰,等.刀具磨损状态监测综述[J/OL].制造技术与机床,1-19[2025-07-01].
- [2]姜银仙.机械加工过程中的刀具磨损监测分析[J].电子技术,2023,52(08):374-375.
- [3]李晓光,张立恒.变工况异源域刀具磨损均衡联合分布适配识别[J].机械制造与自动化,2025,54(03):110-115.
- [4]陈宁宁.基于深度学习的数控机床刀具剩余使用寿命预测[J].造纸装备及材料,2024,53(12):13-15.