

数控加工过程中振动问题的原因与抑制措施

刘佳 张林蔚 苏旭 李国季 梦二华

河南北方红阳机电有限公司精密制造分厂 河南南阳 473000

摘要: 在现代制造业中, 数控 (Numerical Control, NC) 加工技术因其高精度、高效率和高自动化程度而被广泛应用于航空航天、汽车、模具及精密仪器等领域。然而, 在实际加工过程中, 振动问题始终是制约加工质量、刀具寿命和生产效率的关键因素之一。本文系统分析了数控加工过程中产生振动的主要原因, 包括机床结构刚性不足、切削参数选择不当、刀具与工件系统动态特性不匹配、夹具装夹不稳定以及外部环境干扰等; 在此基础上, 从工艺优化、结构改进、主动/被动控制技术及智能监测等多个维度, 深入探讨了当前主流的振动抑制措施。最后, 结合智能制造发展趋势, 对振动抑制技术的未来研究方向进行了展望, 旨在为提升数控加工稳定性与可靠性提供理论支撑与实践指导。

关键词: 数控加工; 振动; 颤振; 切削稳定性; 抑制措施; 智能制造

引言

随着工业4.0和智能制造的深入推进, 数控加工技术正朝着高速、高效、高精方向快速发展。然而, 在追求更高材料去除率和更复杂几何形状加工的同时, 加工系统中的动态不稳定性问题日益突出, 其中以“振动”最为典型。振动不仅会导致工件表面质量恶化(如振纹、波纹度超标), 还会加速刀具磨损甚至崩刃, 严重时可引发机床结构疲劳损伤, 威胁操作安全。数控加工中的振动主要分为两类: 强迫振动和自激振动(颤振)。强迫振动通常由外部周期性激励(如电机不平衡、主轴跳动、齿轮啮合误差等)引起, 其频率与激励源一致; 而颤振则是由切削过程中的再生效应(regeneration effect)引发的自激振动, 具有非线性、时变性和突发性特征, 是影响加工稳定性的核心难题。因此, 深入研究数控加工振动的成因, 并采取有效抑制措施, 对于提升制造系统整体性能具有重要意义。

一、数控加工振动的类型与机理

(一) 强迫振动

强迫振动源于系统外部或内部存在的周期性干扰力。在数控加工中, 常见来源包括: (1) 主轴系统不平衡: 高速旋转主轴若存在质量偏心, 将产生离心力, 引发周期性振动; (2) 传动系统缺陷: 如滚珠丝杠螺距误差、齿轮啮合间隙、轴承磨损等, 会在进给过程中引入周期性扰动; (3) 刀具或工件固有频率激励: 当切削频率接近系统某一固有频率时, 可能发生共振; (4) 外部环境干扰: 如地基振动、邻近设备运行、冷却液泵脉动等。强迫振动的频率通常与激励源频率一致, 可通过频谱分析识别。其幅值虽一般较小, 但长期作用会降低表面质量并加速部件疲劳。

率接近系统某一固有频率时, 可能发生共振; (4) 外部环境干扰: 如地基振动、邻近设备运行、冷却液泵脉动等。强迫振动的频率通常与激励源频率一致, 可通过频谱分析识别。其幅值虽一般较小, 但长期作用会降低表面质量并加速部件疲劳。

(二) 自激振动(颤振)

颤振是切削过程中最危险的振动形式, 其本质是切削力与系统动态响应之间的正反馈机制。Regenerative Effect(再生效应)是颤振的核心机理: 当前切削刃在工件表面留下的波纹, 会被后续刀齿再次切入, 导致切削厚度周期性变化, 从而引起切削力波动; 该波动又进一步激发系统振动, 形成闭环自激^[1]。颤振具有以下特征: 振动频率接近系统模态频率, 而非切削频率; 一旦发生, 振幅迅速增大, 难以自行衰减; 与切削参数(如切深、转速、进给)密切相关, 存在“稳定叶瓣图”(Stability Lobe Diagram, SLD)描述稳定区域。颤振不仅严重破坏加工表面完整性, 还可能导致刀具断裂、机床报警停机, 是制约高效加工的主要瓶颈。

二、振动产生的主要原因分析

(一) 机床结构刚性与动态特性不足

机床作为整个加工系统的物理载体, 其结构刚性、阻尼特性和模态分布直接决定了系统抵抗外部扰动和内部激励的能力。在现代机床设计中, 轻量化虽有助于提升加速度和能效, 但若过度牺牲结构刚度, 则易在切削力作用下产生不可忽略的弹性变形, 进而诱发振动。特

别是主轴悬伸过长、床身筋板布局不合理或立柱截面惯性矩不足等薄弱环节，往往成为振动的“放大器”。此外，若机床的低阶固有频率恰好落在常用切削频率范围内，则极易与切削激励发生共振，导致振动幅值急剧上升。因此，机床的动态特性不仅关乎静态精度，更深刻影响着加工过程的动态稳定性。

（二）切削参数选择不当

切削深度（ a_p ）、切削速度（ v_c ）、进给量（ f ）等参数直接影响切削力大小与方向。过大的切深会显著增加径向力，尤其在铣削中易激发Y向振动；低速切削时，摩擦效应增强，易诱发粘滑振动；而高速切削若未避开颤振不稳定区，同样会引发剧烈颤振。缺乏基于稳定叶瓣图的参数优化，是现场振动频发的重要原因。

（三）刀具-工件系统动态特性不匹配

刀具与工件共同构成一个动态耦合系统，其整体稳定性取决于两者的刚度、质量与阻尼特性的协同。细长刀具（如深孔钻头或长悬伸铣刀）由于自身刚性较低，模态频率往往处于较低范围，在切削力作用下极易发生弯曲或扭转振动；而薄壁类工件（如航空发动机叶片或机匣）则因结构刚性弱，在切削载荷下易产生弹性变形，形成“软支撑”效应。当刀具系统的柔度与工件系统的柔度在空间上叠加时，整个加工系统的等效刚度显著下降，稳定性裕度大幅缩减^[2]。若在工艺设计阶段未对两者进行联合动态建模与匹配优化，即便单独看刀具或工件性能良好，组合后仍可能出现严重振动。

（四）夹具装夹系统不稳定

夹具作为连接工件与机床工作台的关键接口，其稳定性直接影响整个加工系统的刚性基础。装夹刚性不足、定位基准面接触不良、夹紧力分布不均或夹具本体结构松动等问题，均可能导致工件在切削过程中发生微小位移、转动甚至局部松脱，从而引入额外的自由度，削弱系统整体抗振能力。这种情况在加工复杂曲面或薄壁结构件时尤为突出，因为此类工件本身刚性差，对装夹条件极为敏感。若夹具设计未能提供充分且均匀的约束，切削力很容易转化为工件的振动响应，进而通过再生效应诱发颤振。因此，夹具不仅是定位元件，更是动态稳定性的重要保障。

（五）外部环境与辅助系统干扰

尽管常被忽视，但外部环境与辅助系统对加工振动的影响不容小觑。车间地面若存在来自重型设备运行或交通振动的低频扰动，可能通过地基传递至机床底座，

成为强迫振动的源头。冷却系统中的高压泵若存在流量或压力脉动，其流体冲击力也可能通过刀具或工件间接激发振动。此外，电气系统中的电磁干扰可能影响伺服驱动器的控制精度，导致进给运动不平稳，间接引发振动。温度变化引起的热变形虽属缓慢过程，但会改变机床结构的预紧状态和配合间隙，从而间接影响系统刚性与动态特性。这些看似“边缘”的因素，在高精度或长时间连续加工中可能累积成显著的稳定性问题。

三、振动抑制的主要措施

（一）工艺参数优化与稳定域预测

针对颤振问题，最根本的抑制思路是避开其不稳定区域。为此，基于切削动力学理论构建稳定叶瓣图（SLD）成为关键手段。该方法首先通过实验锤击法或有限元仿真获取刀具-工件系统的频响函数（FRF），再结合切削力模型计算出不同主轴转速下所能承受的最大临界切深，从而绘制出稳定与不稳定区域的边界。操作者据此可选择位于稳定叶瓣“峰顶”的高转速参数，实现大进给高效加工，或在低转速区采用较小切深以确保安全。此外，变速切削（SSV）技术通过周期性调制主轴转速，打乱再生效应中波纹相位的一致性，有效破坏颤振的正反馈机制。合理的SSV策略可显著拓宽稳定加工窗口，提升材料去除率，且无需硬件改造，具有较高的工程实用性。

（二）刀具与夹具系统优化设计

提升刀具系统的刚性与阻尼是抑制振动的直接途径。工程实践中，应尽可能缩短刀具悬伸长度、增大刀杆直径，并选用液压膨胀或热装式高精度刀柄以减少接口间隙。对于无法避免长悬伸的场合，可采用内置黏弹性材料的阻尼刀杆（如山特维克的Silent Tools™），通过内部耗能机制吸收振动能量。在刀具几何设计方面，变螺距或变螺旋角立铣刀能够打破切削力的周期性，使激励能量分散在多个频率上，避免集中激发某一模态^[3]。在夹具方面，针对薄壁或复杂曲面工件，应设计随形支撑或多点分布式夹紧结构，必要时引入真空吸附或柔性填充材料以提高接触刚度。对于大型工件，还可增设辅助支撑装置（如中心架或跟刀架），有效提升局部刚性，抑制变形与振动。

（三）机床结构改进与阻尼增强

从机床本体出发，可通过结构优化与阻尼增强提升抗振能力。利用拓扑优化或尺寸优化方法对床身、立柱等关键部件进行重新设计，可在不显著增加重量的前提

下大幅提升刚重比。在已有机床上，可在振动敏感区域（如主轴箱、滑鞍）粘贴黏弹性阻尼层，或安装颗粒阻尼器、调谐质量阻尼器（TMD）等被动耗能装置，通过材料内摩擦或质量反相运动消耗振动能量。更进一步，可集成压电陶瓷作动器或磁流变阻尼器等智能材料元件，构建主动或半主动控制系统。这类系统通过传感器实时感知振动状态，由控制器驱动作动器施加反向力进行抵消，虽成本较高，但在超精密或微细加工领域展现出卓越的抑振效果。

（四）智能监测与自适应控制

随着工业物联网与人工智能技术的发展，基于数据驱动的智能振动抑制成为新趋势。现代数控系统可集成多种传感器（如三轴加速度计、声发射探头、主轴电流监测模块），实时采集加工过程中的多源信号。通过对这些信号进行时频分析、小波变换或深度学习特征提取，可准确识别颤振的早期征兆。在此基础上，系统可自动触发自适应控制策略：例如动态降低进给率、临时减小切深、启动SSV模式，甚至暂停加工进行参数重规划。西门子Sinumerik ONE等高端数控系统已具备Adaptive Feed Control功能，能根据实时负载调整进给速度，在保障效率的同时有效规避过载与振动风险。这种“感知—决策—执行”闭环机制，标志着振动控制从被动应对向主动预防的转变。

（五）材料与冷却策略优化

工件材料本身的物理特性也影响振动行为。例如，灰铸铁因内部石墨片结构具有天然高阻尼特性，抗振性能优于钢或铝合金；某些高阻尼合金（如Mg-Li系）也被用于特殊抗振结构。在冷却润滑方面，传统flood冷却虽能散热，但大量液体可能形成油膜，降低系统刚性感知^[4]。相比之下，高压内冷技术不仅改善刀尖散热，其高速射流还能产生一定的流体阻尼效应，抑制微幅振动。而微量润滑（MQL）通过精准喷射雾化油滴，在减少环境污染的同时避免了液膜干扰，有助于维持系统动态刚度。因此，在绿色制造背景下，合理选择冷却策略亦是振动控制不可忽视的一环。

四、未来发展趋势与挑战

尽管现有技术已能有效应对多数振动问题，但在面向智能制造的新场景下，仍面临诸多挑战。首先，新型

加工工艺（如高速干切、激光辅助切削、超声振动辅助加工）引入了热—力—流多物理场强耦合效应，传统单一场动力学模型难以准确预测复杂激励下的振动行为。其次，数字孪生技术的兴起要求构建高保真度的加工系统虚拟模型，实现振动特性的在线仿真与参数预优化，这对模型精度与计算效率提出更高要求。第三，在边缘计算环境下部署轻量化的AI颤振识别模型，实现毫秒级响应的实时抑制，是智能数控系统的关键能力，但受限于嵌入式平台算力与算法复杂度。最后，在绿色制造约束下，如何在减少冷却液使用、降低能耗的同时维持加工稳定性，成为工艺创新的重要方向。未来研究应聚焦于“感知—建模—决策—执行”一体化的智能抗振体系，推动数控加工从经验驱动向数据与模型双驱动转型。

结语

数控加工过程中的振动问题是多因素耦合作用的结果，涉及机床、刀具、工件、工艺及环境等多个子系统。本文系统剖析了振动的类型、机理及成因，并从工艺优化、结构改进、智能控制等角度综述了当前主流的抑制措施。实践表明，单一手段往往难以彻底解决问题，需采取“预防为主、综合治理”的策略，结合具体加工场景定制化设计抗振方案。随着智能制造技术的深入发展，基于数字孪生、边缘计算和自适应控制的智能振动抑制系统将成为未来主流方向。通过深度融合机理模型与数据驱动方法，有望实现数控加工全过程的“零颤振”目标，为高端制造提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 刘东林. 数控机床切削过程中的振动与控制分析[J]. 中国机械, 2025, (03): 80-83.
- [2] 李洪. 浅谈数控加工中振动的产生及控制[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(04): 80-81+83.
- [3] 杨亚楠, 朱春华, 刘春东, 等. 数控加工过程中缺陷振动仿真[J]. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38(02): 115-118.
- [4] 祁百学, 闫沛渊. 数控机床全闭环振动的分析与处理[J]. 金属加工(冷加工), 2024, (11): 76-79.