

机械加工中机械振动问题分析

陈佰全

郑州机电工程研究所 河南 郑州 450000

摘要: 机械加工中机械振动问题影响加工质量与效率。本文分析振动来源,包括机床结构、切削过程、工件因素;阐述振动对加工精度、刀具寿命、机床性能、加工效率的负面影响;介绍振动监测与诊断技术;提出机床结构优化、切削参数优化、刀具与工件装夹技术改进及主动控制等抑制策略,为解决机械振动问题提供参考。

关键词: 机械加工;机械振动;监测诊断;抑制控制

引言:在机械加工领域,机械振动是常见且棘手的问题。加工时,振动会从多方面干扰正常作业,降低产品质量,缩短设备寿命,影响生产效率。深入剖析振动来源、影响,掌握监测诊断技术,采取有效抑制控制策略,对提升机械加工水平意义重大。

1 机械加工中机械振动的来源

1.1 机床结构因素

机床作为加工过程的载体,其结构特性对振动产生具有基础性影响。机床各部件的刚度与阻尼特性直接决定系统抵抗变形与能量耗散的能力^[1]。若床身、立柱或主轴等关键部件刚度不足,在切削力作用下易发生弹性变形,导致刀具与工件间相对位置偏移,进而引发振动。当床身刚度低于5000N/mm时,在2000N的切削力作用下,变形量可能达到0.4mm,极易引发振动。阻尼特性则影响振动衰减速度,阻尼过小会使振动能量在系统中持续积累,形成持续振荡。机床传动系统的动态特性同样关键,齿轮啮合间隙若超过0.05mm、皮带传动松弛量大于5mm或联轴器不对中偏差超过0.1mm等问题,会引入周期性激振力,使系统产生受迫振动。这类振动频率与传动部件旋转频率相关,若与机床固有频率接近,可能引发共振,显著放大振动幅度。机床基础与地基的稳定性也不容忽视,地基承载力若低于150kPa或存在不均匀沉降超过3mm时,机床整体刚度下降,加工过程中易出现低频晃动,这类振动虽频率低但幅度大,需通过优化地基设计或采用隔振措施加以控制。

1.2 切削过程因素

切削过程的动态特性是振动产生的直接原因。切削力的变化与波动是振动的主要能量来源,断续切削条件下,刀具周期性切入切出工件,切削力频繁突变,易激发系统振动。连续切削时,材料不均匀性或刀具磨损也会引起切削力波动,形成持续振动激励。切削参数的选择对振动影响显著,切削速度过高可能使切削力频率接

近系统固有频率,诱发颤振,当切削速度超过80m/min时,部分机床系统可能因切削力频率与固有频率接近而引发颤振。进给量过大直接增加切削力幅值,加剧振动,若进给量从0.1mm/r增加到0.3mm/r,切削力可能增大2倍,进而加剧振动。切削深度增加会扩大切削面积,使切削力显著上升,超过系统承载能力时将导致振动失控,当切削深度从2mm增加到5mm时,切削力可能增大3倍以上。刀具几何参数与磨损状态同样关键,前角、后角或主偏角设计不合理会改变切削力分布,增加振动倾向;刀具磨损后切削刃变钝,切削力增大且波动加剧,成为振动的重要诱因,刀具磨损量超过0.2mm时,切削力波动幅度可能增大1.5倍。

1.3 工件因素

工件特性对振动的影响体现在材料、形状与装夹三方面。工件材料的物理力学性能直接影响切削力大小,硬质材料或高强度合金需更大切削力,易激发振动,加工硬度为50HRC的工件,所需切削力可能是加工硬度为30HRC工件的2倍。韧性材料可能因积屑瘤形成导致切削力周期性变化,引发振动。工件形状与尺寸对振动的影响表现为结构刚度差异,细长轴类或薄壁件刚度低,切削时易弯曲变形形成振动,长度与直径比超过10的细长轴,在切削时弯曲变形量可能达到0.5mm。复杂曲面工件因加工路径变化频繁,切削力方向不断改变,也可能加剧振动。工件装夹方式与夹紧力是振动控制的最后一环,装夹不稳固会导致工件微小位移,破坏加工稳定性;夹紧力过大可能引发工件变形,夹紧力不足则无法有效抑制振动,夹紧力小于500N时,可能无法有效抑制工件振动,而夹紧力超过2000N则可能使工件产生明显变形。需根据工件特性合理选择装夹方式并精确控制夹紧力。

2 机械振动对机械加工的影响

2.1 对加工精度的影响

机械振动在加工过程中对精度的影响是多维度且显

著的。表面粗糙度变化是振动最直观的表现,振动使刀具与工件间的相对运动轨迹偏离理论路径,导致切削痕迹深浅不一,表面微观几何形状恶化,粗糙度值增大,影响工件表面质量。尺寸精度与形状精度偏差也与振动密切相关,振动引发的周期性位移使实际切削深度或宽度产生波动,造成工件尺寸与设计值偏离;对于复杂曲面或薄壁件,振动还可能引发弹性变形,导致形状精度超差。位置精度误差则体现在振动使工件或刀具在加工过程中发生微小偏移,这种偏移在多工序加工中会累积传递,最终影响工件各部位间的相对位置关系,降低装配精度。

2.2 对刀具寿命的影响

振动对刀具寿命的损害体现在物理与化学双重作用机制下。刀具磨损加速是振动最直接的后果,振动使刀具承受交变应力,切削刃微区材料易发生疲劳剥落,同时振动引发的切削力波动加剧了刀具与工件间的摩擦,使刀具磨损速率显著提升。刀具崩刃与折断风险增加则与振动引发的冲击载荷有关,当振动频率与刀具固有频率接近时,可能引发共振,使刀具承受远超静态条件的应力,导致切削刃瞬间崩裂或刀杆折断,这种突发性失效会严重打乱加工节奏。

2.3 对机床性能的影响

长期振动对机床性能的损害具有累积效应^[2]。机床部件疲劳损伤是振动的主要危害之一,振动使床身、立柱等关键部件承受交变载荷,材料内部微裂纹逐渐扩展,最终引发疲劳断裂,这种损伤初期难以察觉,但会显著降低机床可靠性。机床精度保持性下降则体现在振动使导轨、主轴等运动副的配合间隙增大,传动元件磨损加剧,导致机床运动精度随使用时间延长而逐渐劣化。机床使用寿命缩短是振动综合作用的结果,振动不仅加速部件磨损,还可能引发电气元件松动、润滑系统失效等连锁问题,最终迫使机床提前报废。

2.4 对加工效率的影响

振动对加工效率的制约体现在多个环节。切削速度受限是振动对效率影响的首要表现,为避免振动引发的精度下降或刀具损坏,操作人员往往被迫降低切削速度,导致单位时间材料去除率下降。进给量调整困难则与振动引发的切削力波动有关,增大进给量虽可提升效率,但可能加剧振动,而减小进给量虽能抑制振动,却会降低加工速度,这种矛盾使进给量优化变得困难。加工时间延长是振动对效率最直接的量化影响,振动引发的停机检修、刀具更换或参数调整等非生产时间增加,使整体加工周期延长,生产效率降低。

3 机械振动的监测与诊断技术

3.1 振动监测方法

振动监测是掌握机械运行状态的重要手段。位移、速度、加速度传感器作为核心监测元件,分别通过测量物体位置变化、运动速率及加速度值来捕捉振动信息。位移传感器适用于低频振动监测,能清晰反映结构整体变形趋势;速度传感器对中频振动敏感,可有效识别部件运动状态波动;加速度传感器则擅长捕捉高频冲击信号,对局部故障检测具有优势。监测点选择需遵循关键部位优先原则,重点关注主轴、齿轮箱、轴承座等振动能量集中区域,同时考虑信号可获取性与安装便利性。布置时应兼顾空间覆盖性与信号独立性,避免传感器间相互干扰。多通道同步监测技术通过同时采集多个位置振动数据,可全面还原振动传播路径与能量分布,为故障定位提供多维依据,尤其适用于复杂机械系统的振动分析。

3.2 振动信号处理与分析

振动信号处理是提取故障特征的关键环节。时域分析方法通过计算均值、方差、峰值等统计参数,可快速评估振动强度与波动范围,为设备状态初步判断提供依据。频域分析方法借助傅里叶变换将时域信号转换为频域分布,功率谱密度分析能清晰揭示各频率成分能量占比,帮助识别与故障相关的特征频率。时频分析方法则突破了传统分析的局限性,短时傅里叶变换通过滑动窗口实现信号局部频域分析,小波变换凭借多分辨率特性可同时捕捉信号时变特征与频域细节,对非平稳振动信号分析具有独特优势。这些方法相互补充,共同构建起从宏观到微观的振动信号分析体系。

3.3 振动故障诊断技术

振动故障诊断技术以信号分析结果为基础,实现故障模式精准识别。基于振动特征的故障模式识别通过建立特征参数与故障类型的映射关系,可快速定位齿轮磨损、轴承故障等典型问题。故障树分析采用逆向推理思维,从故障现象出发逐层剖析可能诱因,形成逻辑清晰的故障传播路径图,为系统排查提供方向指引。故障诊断专家系统则整合领域知识库与推理机制,能模拟专家决策过程,对复杂故障进行综合诊断。远程监测与诊断技术依托物联网与云计算平台,实现振动数据实时传输与远程分析,突破地域限制,为分布式设备集群提供智能化运维支持,推动振动监测向预测性维护方向演进。

4 机械振动的抑制与控制策略

4.1 机床结构优化设计

机床结构优化是抑制振动的核心手段。提升机床部件

刚度与阻尼需从材料选择与结构形式两方面协同改进,高强度合金材料的应用可增强结构抗变形能力,而合理布置加强筋或采用整体铸造结构能有效分散应力集中,避免局部刚度不足引发的振动^[1]。传动系统结构优化需关注齿轮啮合精度、皮带张力稳定性及联轴器对中性,通过减小传动间隙与运动误差,阻断因传动链波动引发的受迫振动传递路径。机床基础与地基设计需结合设备重量分布与地质条件,独立基础或减震沟的采用可隔离外部振动源,增加基础质量或配置调谐质量阻尼器能提升系统固有频率,避免与加工振动频率产生共振,从源头降低振动能量输入。

4.2 切削参数优化

切削参数优化需建立动态平衡机制。切削速度、进给量与切削深度的选择需综合工件材料特性、刀具性能及机床动力特性,避免参数组合落入振动敏感区域。变速切削与变进给切削技术通过周期性改变切削参数,打破振动能量积累的连续性,尤其适用于长轴类零件或薄壁件加工中的颤振抑制。刀具几何参数与切削刃形状优化可改善切削力分布状态,增大前角能降低切削力幅值,负倒棱或圆弧刃设计则可增强切削刃强度,减少因切削力突变引发的振动冲击。

4.3 刀具技术改进

选用高性能刀具材料是提升刀具抗振性能的有效途径。高性能材料具有更高的强度、硬度和耐磨性,能在高速、高温切削条件下保持稳定,减少因刀具磨损或损坏引发的振动。例如,采用硬质合金刀具材料,其硬度可达89-92HRA,强度比普通刀具材料提高2-3倍,能有效提升抗振性能。采用刀具涂层技术可在刀具表面形成一层具有特殊性能的涂层,如耐磨涂层、减摩涂层等,提高刀具的切削性能和使用寿命,降低切削振动。开发新型刀具结构与切削方式能从根本上改善切削过程。例如,采用断屑槽设计、可转位刀具结构等,可优化切屑形态,减少切屑与刀具、工件之间的摩擦与冲击,进而

降低振动。

4.4 工件装夹技术改进

工件装夹技术改进需兼顾刚度与柔性需求。装夹方式与夹紧力分布优化需根据工件形状特征与加工部位特点,多点定位或过定位设计可提升工件整体刚度,分步夹紧或弹性夹紧装置能减少装夹变形。柔性装夹与自适应装夹技术通过液压或气动元件实现夹紧力动态调节,可适应不同加工阶段的振动特性变化。工件定位精度与稳定性提升需采用高精度定位元件与重复定位结构,减少因定位误差引发的振动激励,为精密加工提供可靠保障。

4.5 主动控制技术

主动控制技术为振动抑制开辟智能化路径。主动隔振与吸振技术通过传感器实时监测振动信号,驱动执行机构产生反向振动,实现振动能量的主动抵消与吸收。主动振动抑制与补偿技术结合反馈控制算法,可动态调整切削参数或刀具姿态,抑制振动传播路径中的能量放大效应。智能控制算法如模糊控制、神经网络或模型预测控制的应用,能根据振动特征自动优化控制策略,提升振动抑制的适应性与精准度,推动机械振动控制向智能化、自适应化方向发展。

结束语

机械加工中机械振动问题复杂,涉及多方面因素。通过全面监测诊断,可准确掌握振动情况,为抑制控制提供依据。综合运用多种抑制控制策略,从不同角度降低振动影响,能有效提升机械加工精度、刀具寿命、机床性能与加工效率,推动制造业高质量发展。

参考文献

- [1]王魁,王连玉,白立刚.机械加工过程中的振动控制技术[J].现代制造技术与装备,2024,60(4):14-16.
- [2]宋春.机械加工过程中机械振动的原因及对策探讨[J].中国设备工程,2024(11):176-178.
- [3]吕中秋,魏波.基于随机森林算法的机械加工过程设备叠加振动检测方法[J].制造业自动化,2022,44(4):163-165,186.