

# 基于机器视觉的铣刀加工过程在线监测技术研究

林俊 谢丙光

浙江宇盛工具有限公司 浙江 温州 325600

**【摘要】**：铣刀作为切削加工的核心工具，其状态直接影响加工质量与生产效率。本文围绕基于机器视觉的铣刀加工过程在线监测技术展开研究，分析了视觉监测系统的构成与工作原理，探讨了图像采集过程中光照条件、成像参数对图像质量的影响规律，研究了图像预处理、特征提取与状态识别等关键技术，建立了刀具磨损状态的视觉表征方法。研究表明，机器视觉技术能够实现刀具状态的非接触式在线监测，为加工过程的智能化管控提供技术支撑。

**【关键词】**：机器视觉；铣刀状态监测；图像处理；磨损识别；在线检测

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.037

## 引言

现代制造技术对加工自动化与智能化水平提出了更高要求，铣刀在切削过程中承受复杂载荷，随着加工时间延长刀具不可避免地出现磨损甚至破损，这不仅影响加工表面质量，还可能导致机床主轴额外负荷，严重时甚至引发生产事故。因此，对铣刀加工过程进行实时状态监测、及时识别刀具磨损程度与失效风险对于保障加工质量、提高生产效率具有重要意义。

刀具状态监测方法分为直接法与间接法，间接法通过采集切削力、振动、声发射等传感器信号建立与刀具状态的映射关系，但传感器信号易受切削参数变化和噪声干扰；直接法通过对刀具本身进行观察获取几何形态与表面状况信息，但传统直接法需要停机拆卸后检测，效率较低且无法实现过程监测。机器视觉技术的快速发展为刀具状态的直接在线监测提供了新的技术途径，通过工业相机获取刀具图像并运用图像处理方法提取刀具的形态特征与表面纹理信息，可在不中断加工过程的前提下实现刀具状态的自动识别。本文将从视觉监测系统的构成入手，系统研究图像采集、处理与识别的关键技术，分析刀具失效模式的视觉表征方法，为铣刀加工过程的在线监测提供理论依据。

## 1 机器视觉监测系统的构成与成像原理

机器视觉监测系统的硬件构成是决定图像质量的基础，典型系统包括工业相机、光学镜头、光源装置以及图像采集卡等。工业相机负责将光学信号转换为电信号，其分辨率、帧率等直接影响图像的细节表达能力，刀具磨损区域尺寸通常在微米至毫米量级，要求相机具有较高分辨率以捕捉细微磨损特征，同时考虑到刀具在加工过程中可能处于旋转状态，相机帧率需满足动态成像需求避免运动模糊。

光学镜头的选择需综合考虑视场范围、工作距离与成像倍率，铣刀形态多样且刀齿数量与排列方式各不相同，镜头应具备足够视场覆盖刀具的有效检测区域。由于机床内部空间有限相机安装位置受到制约，工作距离的确定需在空间限制与成像倍率之间寻求平衡，远心镜头因其较小畸变和恒定放大倍率而

适用于刀具几何参数的精确检测。

光照条件是影响图像质量的关键因素，合理的照明设计能够增强刀具磨损区域与背景的对比度并抑制反光和阴影干扰。刀具表面通常具有金属光泽容易产生镜面反射导致图像局部过曝或出现光斑，采用环形光源或多角度照明方案可使光线均匀分布从而减小镜面反射影响，光源的色温和稳定性也会影响图像色彩还原一致性，需根据相机感光特性进行匹配。

图像采集过程中的参数设置对后续处理具有重要影响，曝光时间决定了图像的亮度与运动模糊程度，过长的曝光时间会导致旋转刀齿轮廓模糊而过短的曝光则可能使图像过暗损失细节信息。光圈大小控制景深范围，较大光圈可获得更浅景深突出刀具主体但也可能导致边缘区域清晰度下降，实际应用中需根据刀具尺寸、转速以及安装空间等条件通过试验确定最优参数组合。

## 2 刀具图像的预处理与特征增强

采集得到的原始图像不可避免地包含噪声、光照不均以及背景干扰等因素，需要进行预处理以提升图像质量，图像预处理通常包括灰度化、去噪、增强以及图像分割等环节。

灰度化是将彩色图像转换为灰度图像的过程，刀具磨损区域的识别主要依赖于灰度变化特征，灰度化处理可降低数据维度提高处理效率。对于表面涂层刀具不同磨损区域可能呈现差异化的色彩分布，此时可采用保留色度信息的处理方法将色彩特征作为辅助识别依据。

图像去噪的目的是消除采集过程中引入的随机噪声，中值滤波对椒盐噪声具有较好的抑制效果且能保持边缘信息不被过度平滑，高斯滤波适用于消除高斯噪声但可能导致边缘模糊，需根据噪声类型选择合适的滤波算法。图像增强技术用于改善图像对比度突出刀具磨损区域的细节特征，直方图均衡化通过重新分布灰度级使图像对比度得到整体提升，适用于光照分布不均的情况；同态滤波可同时调整图像低频和高频成分有效抑制光照不均匀影响。

图像分割是将目标区域从背景中分离出来的关键步骤，阈

值分割是最常用的分割方法通过设定灰度阈值将图像划分为目标和背景两类,全局阈值适用于光照均匀图像而局部自适应阈值则能处理光照变化较大的情况。对于刀具图像而言磨损区域与未磨损区域的灰度过渡往往较为平缓,单一阈值难以准确分割,此时可采用基于区域生长或分水岭的算法结合灰度与空间信息实现精确分割,形态学运算可用于消除分割结果中的细小噪点并填补断裂区域。

### 3 刀具失效模式的视觉特征与识别方法

铣刀在切削过程中呈现多种失效模式,主要包括后刀面磨损、前刀面月牙洼磨损、微崩刃以及整体破损等,不同失效模式具有各异的形态特征并在图像中表现为灰度、纹理以及边缘轮廓的差异。

后刀面磨损是最常见的刀具失效形式,刀具后刀面与已加工表面摩擦形成平行于切削刃的磨损带,在图像中呈现为与切削刃相邻的亮色区域,磨损带宽度变化是评估刀具状态的重要指标。提取后刀面磨损带的方法包括边缘检测与区域生长两个步骤,首先采用边缘检测算子识别切削刃边缘位置,然后以切削刃为基准在垂直方向上搜索灰度突变点确定磨损带下边界。

前刀面月牙洼磨损发生在刀具前刀面距切削刃一定距离位置,是由于切屑流过前刀面时形成的凹坑,在图像中呈现为暗色区域与周围未磨损表面形成明显反差。由于月牙洼位置和形状随切削过程动态变化,基于灰度分布特征的分析方法更为适用,通过统计前刀面区域灰度变化曲线识别灰度低谷区域作为月牙洼候选位置。

微崩刃与刀具破损表现为刃口的局部缺失或碎裂,在图像中崩刃区域呈现不规则边缘轮廓且刃口直线度发生明显改变。检测崩刃的常用方法是对提取的刃口轮廓进行直线拟合,计算各点偏离拟合直线的距离,当偏离距离超过设定阈值时判定为崩刃区域,对于多齿刀具还需对各刀齿刃口轮廓进行对比分析以识别异常刀齿。

刀具磨损区域的精确测量依赖于图像坐标与世界坐标之间的转换关系,监测系统安装完成后需采用标准尺度块进行标定以确定每个像素对应的实际物理尺寸。对于旋转刀具的多齿检测还需考虑各刀齿在图像中的投影变形并建立相应校正模型,通过标定板多位置拍摄与畸变校正可将测量误差控制在可接受范围内。

### 4 在线监测中的关键技术难题与解决途径

将机器视觉技术应用于铣刀加工过程在线监测面临诸多技术挑战,成像环境的复杂性、刀具运动状态以及监测实时性要求都对视觉监测系统设计与算法选择提出了更高要求。

机床加工区域内切削液飞溅、切屑飞散以及光照变化等因素都会干扰刀具图像的清晰采集,切削液附着在刀具表面会形成液膜从而改变刀具表面反射特性使磨损区域特征模糊。针对

这些问题可采取气幕保护或遮光罩等措施隔离切削液与切屑,确保相机镜头和光源清洁,图像采集时机的选择也至关重要,可在换刀间隙或加工间歇期快速采集图像以避免切削液大量喷淋时间段。

刀具在加工过程中通常处于旋转状态,这给图像采集带来动态模糊问题,当刀具转速较高时即使采用较短曝光时间仍难以完全消除运动模糊。解决途径之一是采用频闪照明或高速相机配合短脉冲光源,在刀具旋转至特定角度时瞬时成像等效于冻结刀具运动;另一种方法是采用旋转编码器同步触发相机,使图像采集与刀具旋转相位保持同步确保每次采集到相同刀齿的同一位置图像。

在线监测对图像处理算法的处理速度提出了较高要求,传统图像处理算法计算量相对较小但识别精度有限,深度学习算法虽能实现更高识别准确率但模型复杂度推理耗时较长。解决这一矛盾的思路是采用边缘计算架构,将训练好的轻量化网络模型部署在靠近相机的嵌入式设备上实现图像快速处理与识别,通过模型剪枝、量化等技术压缩网络规模可在保持较高精度的同时显著提升推理速度。

刀具磨损的渐进性特征决定了监测系统需具备长期运行与状态跟踪能力,随着加工时间延长刀具磨损逐渐加剧图像特征发生缓慢变化。监测系统应能记录刀具磨损历史数据建立磨损趋势曲线为剩余寿命预测提供依据,同时系统需具备自适应能力能够根据磨损进程自动调整监测参数。

### 5 多源信息融合在刀具状态评估中的应用

机器视觉监测虽然能够直接获取刀具几何形态信息,但在某些工况下单一视觉信息难以全面评估刀具状态,将视觉信息与传感器信息进行融合可实现对刀具状态更全面准确的评估。

视觉信息与切削力信息的融合是常见融合模式,切削力信号对刀具状态变化极为敏感,当刀具发生磨损或破损时切削力大小和波动特征会发生明显改变,然而切削力信号受切削参数和工件材料硬度波动影响难以建立统一判别阈值。视觉信息可直接验证刀具实际状态并为切削力信号解释提供基准,当切削力信号出现异常波动时可通过视觉系统快速检查刀具状态,确认是否真正发生磨损或崩刃从而避免误报警。

振动信号与视觉信息的互补性也值得关注,刀具磨损过程中切削振动会逐渐加剧且高频成分增加,振动信号可实时反映切削过程动态特性但对磨损具体形式和位置难以判断,视觉系统则能准确定位磨损发生部位并识别磨损类型与程度。将两者结合既可实现对切削过程稳定性在线监测,又能在出现异常时快速诊断磨损原因。

声发射信号对刀具微观损伤具有较高敏感性,刀具切削过程中发生的微崩刃、裂纹扩展等现象会产生高频声发射信号,这些信号往往先于宏观几何形态变化出现。声发射监测可作为

刀具早期失效预警手段,当检测到异常声发射信号时启动视觉系统详细检查确认刀具状态,这种协同工作模式既可发挥声发射监测灵敏度高优势,又能利用视觉系统消除误报。

多源信息融合的关键在于建立统一状态评估模型,传统方法采用特征层融合分别提取各类信息特征参数并通过机器学习算法建立特征与刀具状态映射关系,深度学习方法的兴起为数据层融合提供了新途径,可将原始图像与传感器信号同时输入神经网络由网络自动学习跨模态特征表示实现端到端状态识别。

## 6 刀具磨损的定量评估与换刀决策

基于视觉监测获取的刀具图像可实现对刀具磨损程度的定量评估,后刀面磨损带宽度是最常用的磨损指标,其测量方法相对成熟且与刀具切削性能具有良好相关性,对于多齿铣刀各刀齿磨损程度往往存在差异,需统计磨损宽度最大值、平均值以及分布范围以全面反映刀具整体状态。

磨损面积与磨损体积是更精细的评估指标,随着三维成像技术发展通过结构光或双目视觉技术获取刀具表面三维形貌已成为可能,基于三维点云数据可精确计算磨损区域体积损失从而更真实反映刀具材料消耗程度,这些先进测量技术对于关键工序或难加工材料的刀具监测具有重要价值。

刀具磨损的阈值设定是换刀决策的关键,阈值过高可能导致刀具过度磨损影响加工质量和机床安全,阈值过低则会造成

刀具浪费增加生产成本。磨损阈值的确定需综合考虑加工精度要求、工件材料特性以及刀具成本等因素,实际生产中可建立分级报警机制,当磨损达到预警值时提醒操作人员准备换刀,当磨损达到极限值时强制停机更换。

刀具剩余寿命预测是换刀决策的高级形式,基于历史磨损数据建立刀具磨损曲线并采用回归分析或时间序列预测方法可估计当前刀具达到磨损阈值所需时间。刀具磨损具有非线性特征,初期磨损较慢中期磨损稳定后期磨损加速,预测模型需能适应这种阶段性变化,对于同类型刀具可通过批量实验建立标准磨损曲线再结合在线监测数据进行个性化修正。

## 7 结论

本文系统研究了基于机器视觉的铣刀加工过程在线监测技术,视觉监测系统的硬件构成与成像参数是获取清晰刀具图像的基础,图像预处理中的去噪、增强与分割技术能够有效提升图像质量并突出磨损区域特征。铣刀典型失效模式在图像中呈现各异视觉特征,需采用边缘检测、形态学分析等方法进行针对性识别。针对成像环境复杂、刀具运动状态及实时性要求等技术挑战,可通过频闪成像、边缘计算及优化算法加以解决。视觉信息与切削力、振动、声发射等传感器信息的融合可实现对刀具状态更全面准确的评估,基于视觉监测获取的磨损指标结合磨损阈值设定与剩余寿命预测可为换刀决策提供科学依据。机器视觉技术在刀具状态监测领域具有广阔应用前景,其在智能制造系统中的作用将日益凸显。

## 参考文献:

- [1] 梁科.微精密机器视觉感知技术在立铣刀磨损检测中的应用[J].石河子科技,2023,(04):17-19.
- [2] 向传龙,胥云.基于机器视觉的铣刀磨损测量[J].自动化应用,2023,64(23):142-146.
- [3] 张博文,沈小龙,韩震宇.基于机器视觉的刀具几何参数测量仪[J].科技与创新,2022,(13):136-139.
- [4] 王磊,郭淑霞,张凤玲,等.微型铣刀外径视觉测量的不确定度[J].光学精密工程,2012,20(04):880-887.