

# 基于电流信号分析的砂轮状态在线监测与自适应修整策略研究

张仁松 吉维汉

南京工艺装备制造有限公司 江苏 南京 210000

**【摘要】**：磨削过程中砂轮性能的退化直接影响加工精度与效率。传统修整策略依赖固定周期或单一阈值，难以动态响应砂轮实际状态。本文提出一种基于数控系统内置电流信号的砂轮状态在线监测与自适应修整方法。通过采集修整前后及磨削过程中的主轴电流与进给轴电流数据，构建电流基准模型，并基于磨削质量反馈建立状态评估规则。在数控磨床上实施后，系统能准确判断砂轮劣化趋势，动态触发修整，实现砂轮使用寿命提升 23.5%，工件合格率提高至 98.3%，为磨削过程的智能化与精益化提供了可行路径。

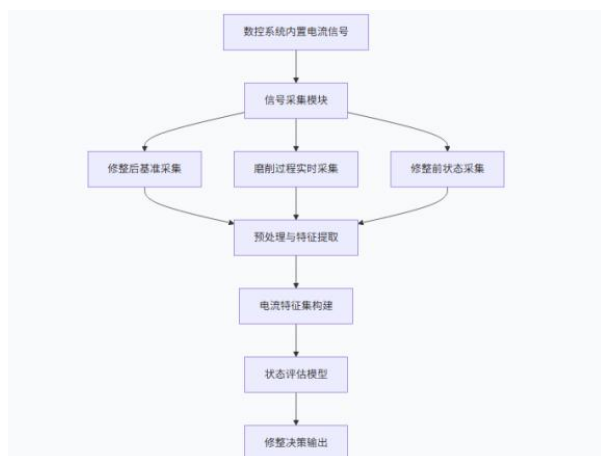
**【关键词】**：砂轮状态监测；电流信号分析；数据驱动建模；自适应修整；工艺优化；数控系统

DOI:10.12417/2811-0528.26.04.070

砂轮磨损是精密磨削中的关键问题，直接影响表面质量与加工稳定性。现有监测方法多依赖外加传感器或固定工艺参数，存在成本高、适应性差等问题。本文提出一种基于数控系统内置电流信号的智能监测方法，通过采集修整与磨削过程中的电流数据，建立砂轮状态评估模型，并嵌入磨削程序实现自适应修整决策，具备良好的工程适用性与经济性。

## 1 系统架构与数据采集流程

该系统深度集成于数控平台，依托系统预留的标准接口，实现对主轴电流  $I_s(t)$  与进给轴电流  $I_f(t)$  的实时精准采集。数据采集工作依据砂轮状态与磨削进程，科学划分为三个关键阶段：其一为修整后基准采集阶段，在砂轮完成修整工序后立即开展试磨操作，同步记录此阶段的电流数据，以此作为后续对比分析的基准参照；其二是磨削过程实时采集阶段，在每一次进给动作执行时，同步采集电流的瞬态变化值与稳态维持值，全面捕捉磨削过程中的电流动态特征；其三是修整前采集阶段，当砂轮出现明显劣化迹象时，及时采集此时的电流数据，为评估砂轮磨损程度及制定修整策略提供数据支撑。数据采集示意图如下：



## 2 电流信号分析与基准模型构建

### 2.1 数据预处理

在获取原始电流信号后，为有效提升数据质量、降低噪声干扰，需对采集到的电流信号开展低通滤波处理。鉴于高频电气噪声主要集中在较高频段，将低通滤波器的截止频率科学设定为 50Hz。通过该滤波操作，能够精准滤除高于 50Hz 的高频噪声成分，同时最大程度保留信号中的有用信息，从而得到更为纯净、稳定的电流信号，为后续分析提供可靠数据基础。其数学表达式为： $I_f(t) = LPF(I(t), f_c = 50\text{Hz})$ ，其中  $I(t)$  为原始电流信号， $I_f(t)$  为滤波后的电流信号，LPF 表示低通滤波操作， $f_c$  为截止频率。

### 2.2 电流特征提取公式

为全面、精准地刻画电流信号特征，构建能够反映系统运行状态的状态表征向量，提取以下多维度电流特征： $FI = [I_s, \mu, I_s, \sigma, I_s, \nabla, I_f, \mu, I_f, CV, R_{sf}]$ 。其中， $I_s, \mu$  代表主轴电流均值，反映主轴电流的平均水平； $I_s, \sigma$  为主轴电流标准差，衡量主轴电流的离散程度； $I_s, \nabla$  是主轴电流趋势梯度，通过滑动窗口线性拟合斜率获取，体现主轴电流的变化趋势； $I_f, \mu$  表示进给轴电流均值； $I_f, CV$  为进给轴电流变异系数，由进给轴电流标准差与均值之比计算得出； $R_{sf}$  为主轴与进给轴电流比值，即  $I_s, \mu / I_f, \mu$ 。

### 2.3 基准电流设定

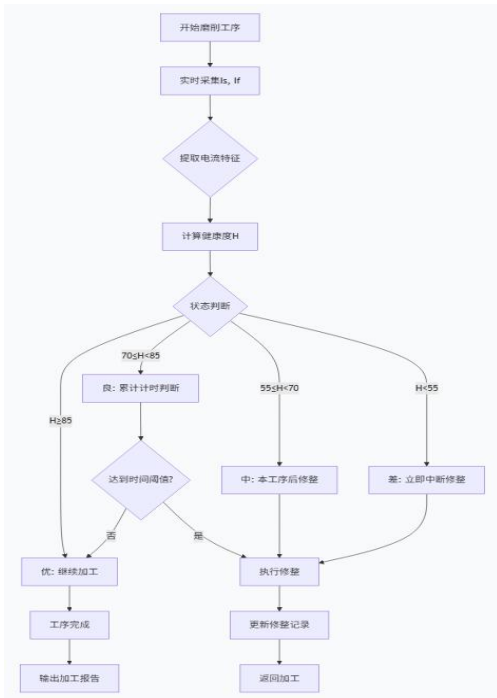
为准确评估砂轮状态，需确定砂轮健康状态下的基准电流值。通过开展多次严谨实验，综合考量工件表面粗糙度、尺寸精度等关键质量指标，最终确定主轴电流基准值  $I_{s0}$  与进给轴电流基准值  $I_{f0}$ 。同时，考虑到实际生产过程中存在一定工艺波动，允许电流值在基准值的基础上有  $\pm 5\%$  的波动范围，以此构建合理的工艺波动带，为砂轮状态监测提供科学、准确

的参考依据。

3 砂轮状态评估与修整决策机制

在砂轮状态监测体系中，为精准量化砂轮的实际运行状态，依据电流信号偏离预先设定的基准值的程度，对砂轮状态实施科学分级。具体而言，以电流波动幅度作为关键分级指标，将砂轮状态细致划分为四个等级。当电流波动幅度小于5%时，判定砂轮处于“优”级状态，表明此时砂轮运行极为稳定，各项性能指标均处于理想水平；若电流波动幅度处于5%至15%区间，则砂轮状态为“良”，意味着砂轮运行基本正常，但存在一定程度的性能波动；当电流波动幅度在15%至25%范围内时，砂轮状态被定义为“中”，提示砂轮性能出现较为明显的变化，需密切关注；若电流波动幅度超过25%，则砂轮状态为“差”，表明砂轮性能严重劣化，需及时采取相应措施进行处理。

3.1 修整判断流程图



3.2 修整触发策略

在砂轮运行状态监测与维护管理流程中，需依据不同状态等级制定精准且合理的修整触发策略，以保障加工质量与砂轮使用寿命。具体而言，当砂轮状态被判定为“差”时，意味着砂轮性能已严重劣化，继续运行极有可能引发加工质量大幅下降甚至设备故障等严重后果，故需立即中断当前加工进程，并即刻启动砂轮修整程序，以快速恢复砂轮性能。若砂轮状态为“中”，表明砂轮性能出现一定程度的波动，但尚可维持当前工序的继续进行，为避免频繁中断加工影响生产效率，可选择

在当前工序结束后，再对砂轮进行修整操作。而当砂轮状态处于“良”时，则需综合考量累计加工时间或已加工工件数量等因素，依据预设的阈值来判断是否触发修整流程，以此实现砂轮维护与生产效率的平衡。

4 系统实现与工艺优化

4.1 模型嵌入数控程序

在智能化磨削加工体系构建中，为达成对砂轮状态的实时精准监测与动态调控，将精心构建的状态评估模型深度嵌入磨削宏程序之中。磨削宏程序作为数控系统中实现特定磨削加工功能的核心代码集合，具备强大的逻辑控制与数据处理能力。通过将状态评估模型嵌入其中，能够充分利用数控系统的高速运算与实时响应特性，在磨削加工过程中，依据实时采集的电流信号等关键数据，借助模型内置的算法与逻辑判断机制，对砂轮的当前状态进行迅速且准确的评估。一旦模型判断砂轮状态达到预设的修整触发条件，宏程序将立即自动调用修整程序模块，实现对砂轮的及时修整操作。这种将状态评估与修整调用功能集成于磨削宏程序的方式，不仅极大地提升了磨削加工过程的自动化程度，减少了人工干预可能带来的误差与延误，还能确保砂轮始终处于良好的工作状态，从而有效保障加工质量的一致性与稳定性，提高生产效率与经济效益。

4.2 修整参数自适应

为进一步提升砂轮修整的精准性与有效性，依据砂轮的当前状态等级，动态计算修整深度  $dr$ 。修整深度作为影响砂轮修整效果的关键参数，其合理设定对于恢复砂轮的几何形状与切削性能至关重要。在此，采用基于主轴电流趋势梯度的自适应计算方法，具体公式为： $dr = d_{base} \times \left(1 + k \cdot \frac{I_{s\nabla}}{I_{s0}}\right)$  其中， $d_{base}$  为基础修整量，它是根据砂轮材质、尺寸以及加工工艺要求等因素预先设定的一个固定值，为修整深度提供了一个基本的参考基准； $k$  为自适应系数，其取值通过大量的实验研究与数据分析确定，用于调节主轴电流趋势梯度对修整深度的影响程度，确保修整深度的调整既不过于激进也不过于保守； $I_{s\nabla}$  为主轴电流趋势梯度，它反映了砂轮在磨削过程中电流的变化趋势，能够在一定程度上体现砂轮的磨损状态与切削性能变化； $I_{s0}$  为主轴电流基准值，代表砂轮在健康状态下的电流水平。通过这种自适应计算方法，能够根据砂轮的实际状态实时调整修整深度，实现修整参数的精准优化，从而提高砂轮修整的质量与效率，延长砂轮的使用寿命，降低生产成本。

5 工业验证与效果分析

在数控导轨磨床（西门子 828D 系统）上进行为期 6 个月的对比试验，材料为 GCr15 轴承钢。传统策略每完成固定磨

削量后修整，自适应系统根据电流模型动态决策。关键结果如下：

| 评估指标         | 固定修整策略 | 自适应策略 | 提升效果      |
|--------------|--------|-------|-----------|
| 单砂轮加工工件数（件）  | 237    | 293   | +23.5%    |
| 设备综合利用率（OEE） | 78.5%  | 86.7% | +8.2 个百分点 |
| 工件合格率        | 95.2%  | 98.3% | +3.1 个百分点 |
| 平均修整间隔（分钟）   | 12.5   | 17    | +36%      |
| 系统误判率        | —      | <5%   | 可靠运行      |

通过在西门子 828D 系统数控导轨磨床上开展的为期 6 个月对比试验，以 GCr15 轴承钢为加工材料，对传统固定修整

策略与基于电流模型动态决策的自适应策略进行了全面评估。试验结果清晰地表明，自适应策略在多个关键指标上均展现出显著优势。单砂轮加工工件数的提升，意味着砂轮使用寿命的有效延长，降低了砂轮更换频率与成本；设备综合利用率的大幅提高，反映出生产流程更加高效顺畅，减少了设备闲置时间；工件合格率的提升，直接保证了产品质量的稳定性与一致性，增强了产品在市场中的竞争力；平均修整间隔的延长，减少了非必要的修整操作，提高了整体加工效率；而系统误判率低于 5%且可靠运行，进一步验证了自适应系统的稳定性与准确性。综上所述，自适应砂轮修整策略在数控导轨磨削加工中具有广阔的应用前景与推广价值，有望为制造业带来更高的生产效益与质量保障。

## 6 结论

本研究通过采集与分析数控系统内置电流信号，建立了砂轮状态评估模型，并实现了自适应修整决策。系统在不增加硬件成本的前提下，显著提升了砂轮寿命、加工质量与设备利用率，具备良好的工程推广价值。未来将进一步研究砂轮剩余寿命预测、多砂轮协同优化，并与 MES 系统集成，实现磨削单元的全流程智能化管理。

## 参考文献：

- [1] 魏勇召,马龙.基于定子电流信号分析的机车牵引电机轴承故障诊断方法[J].电力机车与城轨车辆,2025,48(02):116-119.
- [2] 王燕媛.基于电流和振动信号的交流异步电机故障分析及融合诊断技术研究[D].常州大学,2024.
- [3] 王龙,杨理钧,汪刘应,等.基于力信号的砂轮磨削状态在线监测研究[J].工程科学学报,2024,46(12):2289-2296.
- [4] 汪旋.基于磨削温度的砂轮磨损状态在线监测技术研究[D].华侨大学,2020.
- [5] 王嘉,葛曼哲,王子铭,等.服役工况下基于电流信号的工业机器人谐波减速器故障建模[J].机械工程学报,2025,61(18):366-377.