

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2015.15.035

## 基于电流信号和振动信号的刀具失效监测研究

罗忠良<sup>1,2</sup>, 卢万强<sup>2</sup>

(1. 四川省装备制造业产业集群技术创新中心, 四川德阳 618000;

2. 四川工程职业技术学院, 四川德阳 618000)

**摘要:** 针对单一信号监测刀具失效状态存在的缺陷问题, 提出电流信号和振动信号的融合方式辨识刀具失效的监测方法。研究了监测信号的预处理和特征提取方法, 利用有限元分析软件建立了刀具失效状态监测的多参数融合模型, 得出了刀具失效实时判定准则。研究结果表明: 电流信号和振动信号的特征融合方式能有效提高刀具失效在线监测实时辨识的准确性和稳定性。

**关键词:** 刀具失效; 电流信号; 振动信号; 实时辨识

**中图分类号:** TH16; TG71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2015) 15-139-3

### Study on Failure of Tool Monitoring Based on Current Signal and Vibration Signal

LUO Zhongliang<sup>1,2</sup>, LU Wanqiang<sup>2</sup>

(1. Sichuan Equipment Manufacturing Industry Cluster Technology Innovation Center, Deyang Sichuan 618000, China; 2. Sichuan Engineering Technical College, Deyang Sichuan 618000, China)

**Abstract:** Aimed at a single signal monitoring tool failure problem of existence state, the monitoring method of fusion recognition tool failure of current signal and vibration signal was presented. The monitoring signal preprocessing and feature extraction method were researched, the parameters fusion model of tool failure monitoring was established using finite element analysis software, the real-time criterion of tool failure was got. Research results show that the characteristics of current signal and vibration signal fusion methods can effectively improve the on-line identification of tool failure monitoring accuracy and stability.

**Keywords:** Tool failure; Current signal; Vibration signal; Real time identification

## 0 前言

金属切削加工中, 刀具失效会造成机床振动, 加工质量下降, 甚至是工件报废和停机故障, 统计显示, 刀具失效引起的停机故障占数控机床总停机时间的1/5~1/3。研究表明, 配备刀具监测系统后的数控机床不仅可以大幅减少故障停机时间, 而且能提高生产率10%~60%, 提高机床利用率50%以上, 节约加工成本30%左右<sup>[1]</sup>。研究开发刀具失效监控系统, 对防止工件报废和设备损坏, 保证人员安全和提高生产效率具有较大的理论意义和经济效益。

国内外学者对刀具的失效监测提出了许多有效的方法, 主要包括切削力、声发射、振动、电机电流和加工表面质量等, 大多属于单一监测方法, 在实际应用中都有一定的局限性。本文作者提出电流信号和振动信号的融合监测法, 是充分利用各个监测量的长处, 互补短处, 拓宽监测范围, 提高监测精度和判别成功率。

### 1 刀具失效监测信号的选择

金属切削加工过程中, 在刀具、工件及切削参数等保持不变, 其他因素相对稳定时, 一旦刀具失效

(磨损或破损) 就会引起切削力的波动, 进而引起切削转矩的改变, 导致主轴电机电流出现相应的变化, 故而可以通过主轴电机电流信号的变化实现对刀具失效状态的监测。南昌大学的冯艳等人<sup>[2]</sup>研究了机床主轴电机电流信号的采集、存储和分析。同时电流传感器价格便宜, 安装方便, 非常适合于实际工程项目的应用。电机的三相电流分别为 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ , 采用的电机电流等效方法, 可以得到主轴电机电流的RMS值为

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{(I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) / 3}$$

为了提高监测系统的可靠性, 还可以辅助采集切削时的振动信号, 利用振动信号对于工况变化的高灵敏度, 及时掌控刀具的失效状况<sup>[3]</sup>。

实际监测应用中常以主轴电机电流信号为主, 切削振动信号为辅。

### 2 刀具失效监测信号的预处理

考虑到实际切削加工环境中存在较多的电磁干扰和噪声干扰, 这些干扰信号会严重影响监测信号质量, 甚至淹没各种有用的特征信号, 因此需要对信号进行预处理。首先对信号进行频域分析, 找到反映刀具失效状态的频率成分。图3为刀具失效前后主轴电

机电流时的频率波形图, 切削参数为主轴切削速度  $v_c = 180 \text{ m/min}$ , 进给速度  $f = 120 \text{ mm/min}$ , 单边切削深度  $3 \text{ mm}$ ; 采样频率  $f_s = 2000 \text{ Hz}$ , 从图 1 中可以看出主要是主轴转频和转频倍频在变化, 如 4.03、5.98、9.89 等频率。

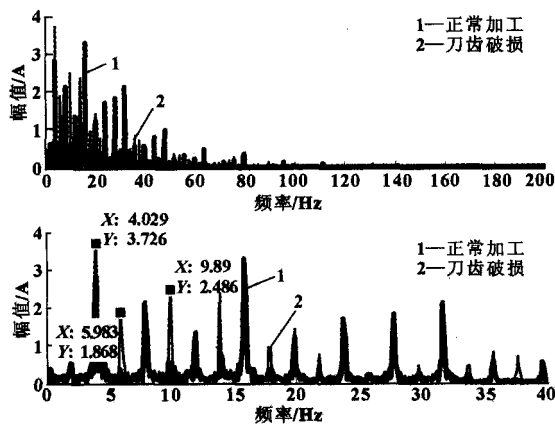


图 1 刀具破损前后主轴电流频谱

主轴电机的电流信号随着主轴转频及其倍频在刀具失效前后有明显的不同, 需要对信号进行硬件低通滤波, 提高信噪比。

同时对主轴电机电流信号对应的振动信号进行快速傅立叶 (FFT) 变换, 可以发现振动信号在低频段没有明显变化也无其他频率段的分量产生, 所以无需对振动信号滤波。

### 3 刀具失效监测信号的特征提取

特征值的提取会直接影响到监测系统的准确性和灵敏度。统计方法是比较实用和方便的特征提取方法, 常用的统计值有均值、均方根值与方差等。刀具失效时某刀齿对工件的切削量会减少, 甚至是无切削, 而与之相邻的刀齿的切削量也会发生变化, 因而会引起刀齿切削负载变化, 对数据进行滑动分段, 相邻两段数据相减得到数组  $S$ , 再对  $S$  分别提取下面是常用的几个统计值<sup>[4-5]</sup>:

(1) 均值

$$D_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i$$

(2) 方差

$$D_{\text{var}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (S_i - D_{\text{mean}})^2$$

(3) 最大值

$$D_{\text{max}} = \max(S)$$

(4) 能量

$$D_{\text{pow}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2$$

通过计算区分度  $p$  来衡量上述各特征值的优劣。

$$dy = \max - \min$$

$$p = (b_{\text{max}} - \max) / dy$$

式中:  $\max$  是正常切削加工的最大值,  $\min$  是最小值,  $b_{\text{max}}$  表示刀具破损时刻的最大值, 用  $dy$  衡量特征值在正常加工的波动范围, 用  $p$  衡量刀具破损与刀具正常两种的状态的区分度,  $p$  越大表示两种状态区分越明显。图 2 是一次试验中捕捉到的失效信号的 4 个特征值。

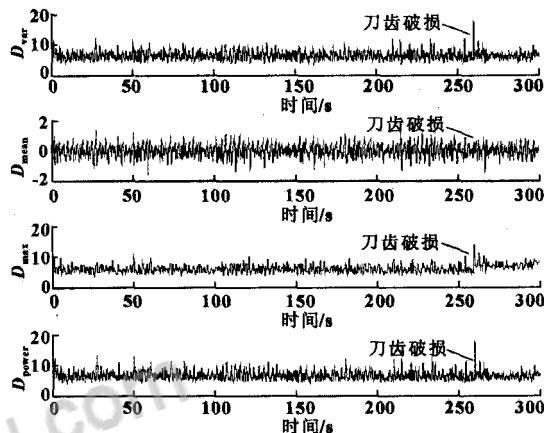


图 2 电流信号 4 种特征值波形

4 个特征值的对比如表 1 所示。

表 1 电流信号 4 种特征值效果比较

| 特征值                | 区分度 $p$ | 效果      |
|--------------------|---------|---------|
| $D_{\text{var}}$   | 87%     | 辨识效果比较好 |
| $D_{\text{mean}}$  | 0%      | 辨识不出    |
| $D_{\text{max}}$   | 57%     | 不明显     |
| $D_{\text{power}}$ | 21%     | 不明显     |

应用同样的分析方法, 对试验的几组数据的电流信号和振动信号也进行特征值分析, 结果证明电流信号和振动信号的特征值  $D_{\text{var}}$  对刀具失效辨识效果较好。

需要注意的是特征值相关参数 (滑动步进长度、滑动窗口长度等) 的合理选择对于特征提取的成功至关重要。滑动步进长度太长, 将大大延迟发现刀具破损的时间, 并且可能掩盖刀具破损的突变状态, 而步进长度太短, 则会增加系统运行的负荷。通过试验对比分析, 电流信号和振动信号的数据分段长度取半转的时间长度时, 效果较好。

### 4 刀具失效监测信号的实时辨识

刀具在切削加工过程中的可能出现磨损和破损等不同的失效形式。实验分析发现刀具磨损在一定的范围以内, 监测的电流和振动信号的特征值变化平缓, 无显著突变现象。而刀具破损程度对特征值的影响变化比较显著, 完整刀齿和破损一齿时, 加工得到的主轴电流信号时域幅值差别不大, 破损两个齿时, 与前面两种类型的时域幅值差别就比较大。电流信号的特



征值随着破损齿数的增加, 特征值在时域上呈上升趋势, 这是因为破损齿与正常齿之间存在一定负载差异, 波形相减就会得到差异值, 破损一个齿比破损两个齿的波动小, 又比正常齿的波动大, 可见特征值与刀具的破损程度相关。如图 3—4 所示。

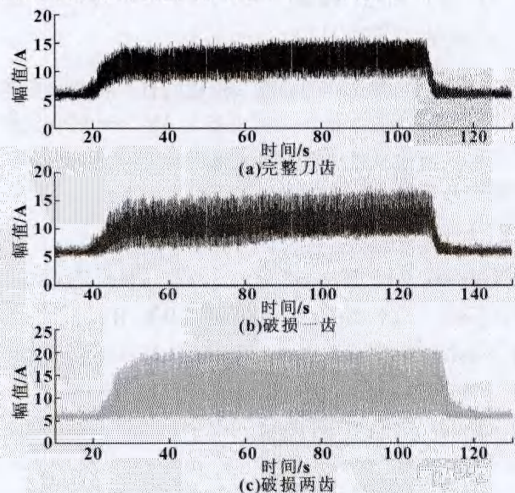


图 3 刀具不同破损程度的电流信号波形

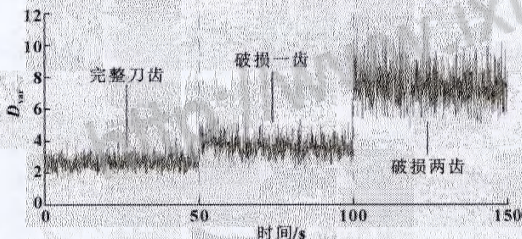


图 4 刀具不同破损程度的电流信号特征值

对于振动信号而言, 不同程度的刀具破损的振动信号从时域上很难看出完整刀具加工、破损一齿与破损两齿加工的区别。频域分析时, 完整刀具和破损一齿的特征值的波动比较严重, 破损两齿的特征值波动比较小。在原始信号中, 两个破损刀具加工的信号要比前两组的幅值要小, 这可能是由于刀具齿数改变影响了刀具装夹系统的刚度, 这种影响不容易确定。从本实验数据看出, 振动信号的波动比较大, 在实际应用中一般作为参考。如图 5 所示。

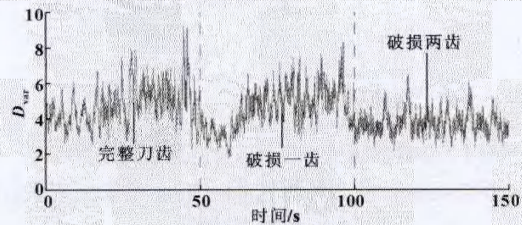


图 5 刀具不同破损程度的振动信号特征值

综合电流信号和振动信号, 两种不同工况下, 信号特征值的比较结果如图 6 所示。

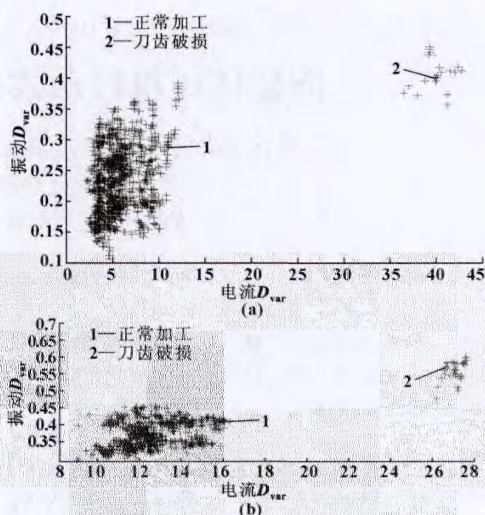


图 6 两组不同工况信号特征值分析

对上述所有试验数据进行融合分析, 得出以下的刀具失效实时判定准则:

(1) 当电流信号和振动信号都超过各自阈值, 时间达到转周期的 5%~15% 时, 表明严重破损, 立刻报警;

(2) 当电流信号超过阈值而振动信号没有超过阈值时, 表明有可能轻微破损, 进行等待, 时间达到转周期 10%~30% 时进行报警;

(3) 当电流信号没有超过阈值而振动信号超过阈值时, 表明有意外干扰, 可以不报警。

## 5 刀具失效监控系统的研制

根据上述研究, 开发了铣削刀具监测系统。如图 7。传感器安装如图 8。

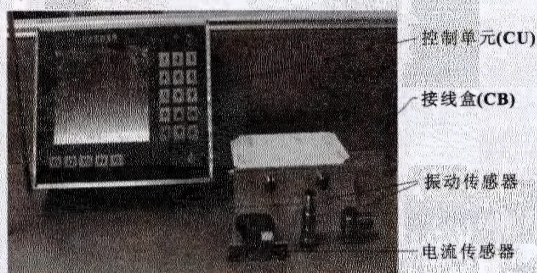


图 7 铣刀失效检测系统



图 8 传感器安装示意图

(下转第 97 页)



通过调整 PIL 的输入区间和检测到的振荡频率做一个对比能够输出一个比例增益衰减系数, 当发生高频振荡时能够快速有效地抑制此现象。

#### 4 实际应用结果

以某 1780 带钢热轧现场为例, 将此振荡检测器与抑制算法投入后的效果如图 8、9。

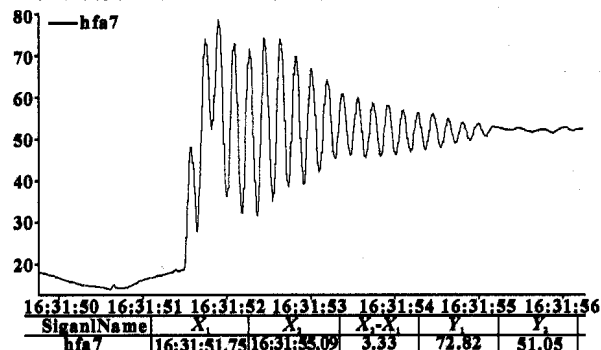


图 8 算法投入前

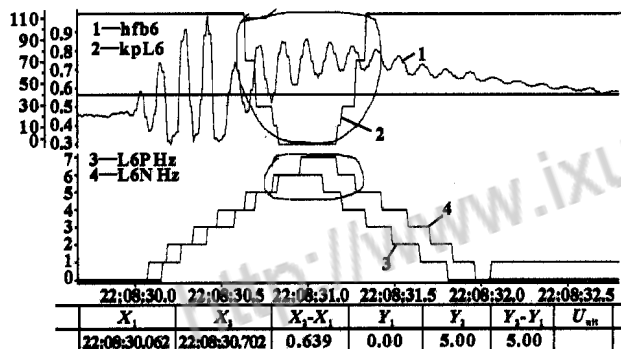


图 9 算法投入后

在高频振荡检测算法投入后的后机架活套张力曲线如图 8 所示, 进入高频振荡到恢复需要 3.3 s。而投入后的曲线如图 9 所示, 其中 L6P Hz 和 L6N Hz 分别为正向及反向振荡频率, kpL6 为算法投入后的张力环比比例增益, 由曲线可以明显看出发生高频振荡时检测频率阶梯上升, 经过 640 ms 后超过抑制算法中设定的 5 Hz 区间, 之后立即衰减比例增益, 衰减比例增益的同时, 张力的高频振荡现象得到有效抑制(圈内区域)。

#### 5 结论

采用高频振荡检测器及其抑制算法借用非线性 PID 思想, 通过变增益, 很好地解决活套起套初期带钢张力波动。但又不会大幅度地修改原算法程序。

作者在某 1780 带钢热轧现场投入使用证明效果极好, 该算法能够保证带钢在头部穿带的稳定性以及头部质量, 尤其轧制极宽极薄规格的带钢。同时该算法也可用到其他场合。

#### 参考文献:

- [1] 童朝南, 武延坤, 刘磊明, 等. 液压活套多变量系统的建模及积分变结构控制[J]. 自动化学报, 2008(10): 1305-1311.
- [2] 傅剑, 杨卫东, 刘彤, 等. 活套张力矩实时计算的多项式逼近算法[J]. 控制工程, 2004(3): 226-228.
- [3] 李腾飞, 吴怀宇, 王刚强, 等. 液压活套非线性趋近控制器动态特性分析[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2006(3): 259-262.

(上接第 141 页)

#### 6 结论

(1) 电流信号和振动信号便于检测, 且信号提取方便。

(2) 该刀具失效监测系统能完成刀具失效信号的采集、特征提取、准确的辨识刀具失效并触发机床进给保持, 达到了刀具失效监控的目的。

(3) 多参数融合式刀具监测能有效提高监测的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 马旭, 陈捷. 数控机床刀具磨损监测方法研究[J]. 测量与检测技术, 2009(6): 70-73.
- [2] 冯艳, 罗良玲, 夏林. 基于 LabVIEW 的刀具磨损在线监控系统[J]. 大众科技, 2006(8): 62-71.
- [3] 杨永. 数控机床刀具磨损的振动监测[J]. 测量与检测技术, 2009(7): 58-60.
- [4] 徐建嵘, 张轲, 崔西宁. 声发射刀具失效监控系统研究

[J]. 航空学报, 1993(8): B372-B376.

- [5] 徐春广, 王信义, 邢济收, 等. 自动化刀具切削状态监控仪的研究[J]. 北京理工大学学报, 1998(6): 279-283.
- [6] 高鹏磊, 库祥臣. 数控机床刀具磨损状态特征参数提取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(6): 65-67.
- [7] 孙艳杰, 艾长胜. 基于切削声和切削力参数融合的刀具磨损状态监测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(5): 42-45.
- [8] 樊宁, 郭培全, 王慧, 等. 刀具磨损过程切削力频谱特性的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(5): 69-71.
- [9] 刘臻, 陈统坚, 彭永红. 刀具失效研究发展动态综述[J]. 机床与液压, 2000(5): 3-5.
- [10] 郑建明, 李言, 李鹏阳, 等. 基于切削力信号时域频域特征融合的刀具磨损监测[J]. 机械与电子, 2001(3): 46-48.
- [11] 张家梁, 李蓓智, 庞静珠. 刀具磨损过程中的切削力特征研究[J]. 制造技术与机床, 2010(5): 111-113.

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

---