

## 铣削过程多参数监测策略研究

章 建 (华东工学院机械制造系, 南京, 210014)

王 珉 张幼桢

(南京航空航天大学机械工程系, 南京, 210016)

### STUDY ON MULTIPARAMETER MONITORING STRATEGY FOR MILLING PROCESS

Zhang Jian

(Department of Machine Building, East China Institute of Technology, Nanjing, 210014)

Wang Min, Zhang You-zhen

(Department of Mechanical Engineering, Nanjing University  
of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**摘 要** 通过在时域和频域对端铣过程铣削力和铣削振动信号特征的分析, 提取出对铣刀磨损和破损状态变化十分敏感的特征参量, 在此基础上提出了由基于铣削力的“时段比值”监测策略和基于铣削振动的“硬件比较”监测策略组成的多参数监测策略。

**关键词** 在线监测, 刀具磨损, 刀具破损, 铣削力, 铣削振动

**Abstract** In-Process Monitoring of wear and breakage states of cutting tools is one of the most important problems to be solved in the unmanned machining process. This paper has first made a detailed analysis about the signal characteristics of milling forces and vibration in both time domain and frequency domain and extracted correspondingly the characteristic parameters from these signals which are very sensitive to variations of milling tool wear and breakage states. Based on this, a multiparameter monitoring strategy which consists of milling force based “Time Section Ratio” monitoring strategy and milling vibration based “Hardware Comparison” monitoring strategy was presented; which has been implemented in a microcomputer APPLE-II centered comprehensive monitoring system and can solve such problems as real time, effectiveness and reliability in the monitoring of wear and breakage states of milling tools.

**Key words** in-process monitoring, tool wear, tool breakage, milling force, milling vibration

对于刀具磨损和破损状态的在线监测(In-Process Monitoring)是无人化机械加工中的关键问题之一<sup>[1]</sup>。本文对现代制造系统中广泛采用的端铣加工过程中的铣削力和铣削振动信号的时域和频域特征进行了较为详细的分析。根据其信号变化与铣削过程刀具磨损和破损状态之间的内在关系, 提出了基于铣削力和铣削振动信号变化的多参数综合监测策略。

### 1 基于铣削力的监测策略

#### 1.1 铣削力信号特征分析

大量研究结果表明, 在切削力、切削力矩、以及切削分力比与刀具磨损和破损状态之间有着最直接的内在联系。实验采用了一台台式测力仪测量三个相互垂直方向的分力

$F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$ 。实验表明, 轴向力  $F_z$  对铣刀的磨损和破损状态不敏感, 因此不宜作为被监测特征参量用于刀具状态的在线监测<sup>[2]</sup>。

$F_x$  和  $F_y$  是由主切削力  $F_1$  和进给力  $F_2$  在  $X$  和  $Y$  方向分别投影后代数合或所得, 其间量化关系如图 1 所示为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F_1 \sin\varphi - F_2 \cos\varphi \\ F_y &= F_1 \cos\varphi + F_2 \sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$$

由于主切削力  $F_1$  在端铣过程中, 方向会发生变化(由图 1 中  $\varphi$  角的变化而反映出来), 因而导致  $F_y$  在端铣过程中方向不稳定。图 2 所示为  $F_x$  和  $F_y$  的时域信号对应于铣刀所处的不同磨、破损状态的响应情况。由图 1 可见, 由于  $F_y$  在一周切削过程中的方向变化会给信号采集和处理带来许多不便, 因此也不宜作为监测系统里的被监测参量。另外还可见,  $F_x$  的时域信号对应于铣刀的切入-切削-切出过程有明显的响应; 对应于刀具的不同磨损状态, 其信号幅度亦有明显的变化。尤其对应于铣刀与工件接触切削过程后半段(前、后半段的划分以图 1 中的 0-0 线为界)的  $F_x$  时域信号的变化最为明显。这一现象是由切削机理所决定的。因为随着刀具磨损程度的增加, 以进给力  $F_2$  的增加最为明显<sup>[2]</sup>。由图 1 和式(1)可知, 在切削接触过程后半段中( $\varphi > 90^\circ$ )  $F_1$  和  $F_2$  在  $X$  方向上的投影相加, 因此  $F_x$  后半段信号幅值的变化可以十分明显地反映出刀具的磨损状态。另外, 当刀具产生破损时,  $F_x$  同样有十分明显的变化<sup>[2]</sup>。因此, 对应于铣削接触过程后半段的  $F_x$  时域信号被最终选为监测铣刀磨损破损状态的特征参量之一。

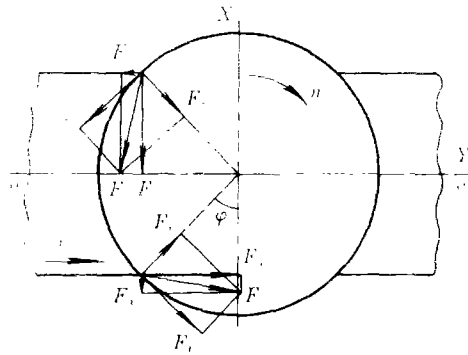


图 1 端铣过程平面分力组合关系

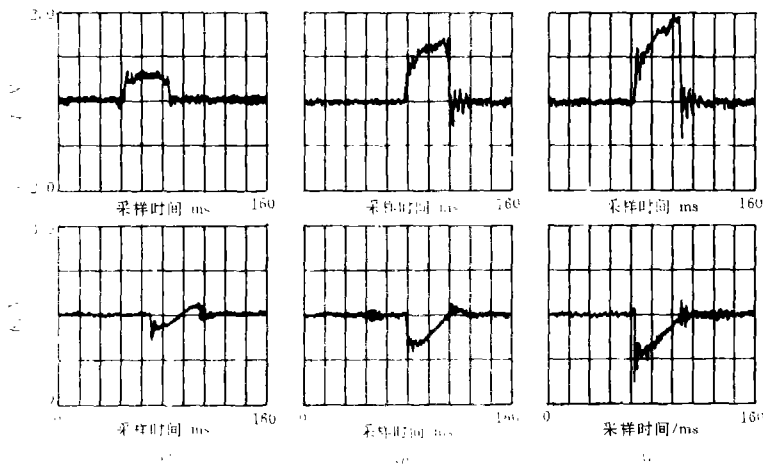


图 2  $F_x$  和  $F_y$  时域信号对刀具不同状态的响应  
(a)正常切削 (b)初步磨损 (c)急剧磨损

## 1.2 时段比值监测策略

在确定了被监测的特征参量之后, 最关键的问题之一是确定监测评价标准, 即信号辨识阈值。在刀具正常切削状态下,  $F_f$  和  $F_r$  都比较小, 此时的  $F_x$  值可作为判别基准  $F_{xb}$ , 其值为

$$F_{xb} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{xi} \quad (2)$$

其中  $F_{xi}$  为  $F_x$  的瞬时采样值,  $N$  为样本长度。

在后续的铣削过程中, 计算机将在线地计算  $F_x$  的瞬态均值

$$F_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{xi} \quad (3)$$

并根据比值

$$\mu = F_x / F_{xb} \quad (4)$$

的变化实时监测刀具磨、破损的当前状态。监测的阈值可采用预试验或专家系统方式来确定。必须注意的是,  $F_{xb}$  和  $F_x$  应该来自切削接触过程的同一个时间段, 此即时段比值监测策略。

## 2 基于铣削振动的监测策略

### 2.1 铣削振动信号特征分析

许多试验表明, 在切削振动与刀具磨损状态之间存在着较为紧密的内在关系<sup>[1,2]</sup>。图 3 所示为在本研究中用加速度计从测力仪上提取出来的铣削振动时域信号和表征其能量情况的功率谱信号。

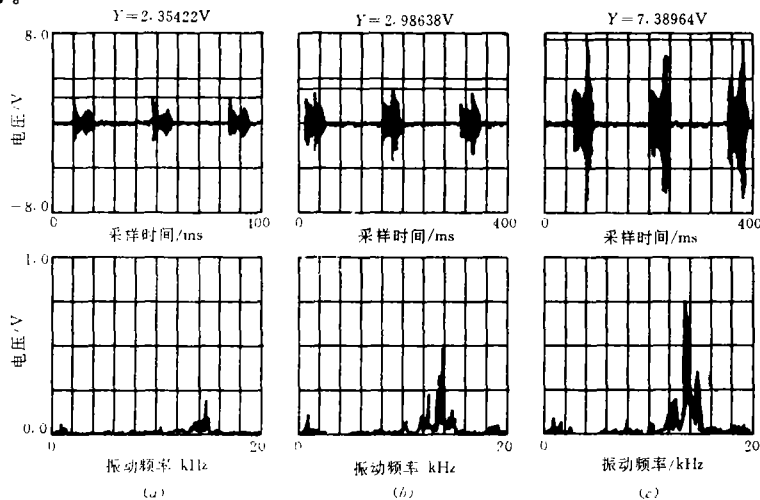


图 3 铣削振动信号与不同刀具状态间的关系

(a)正常切削; (b)初期磨损; (c)急剧磨损

由图 3 可见, 对应于刀具的切入/切出循环和不同的磨损状态, 铣削振动时域信号幅值都有较大的变化。另外, 随着刀具磨损状态的加剧, 铣削振动信号的总能量也有明显的增加。值得注意的是, 信号能量的增加并不是在整个频率范围内均衡地增加, 而是在某个特征频段范围内有较其它频率处大得多的能量激增。对应于图 3 相同的传感位置, 其振动信号能重增长趋势如图 4 所示。这一现象由端铣机理所决定, 特征频段的位置取决于测点

处的刚度和传递函数<sup>[2]</sup>。这一现象给人一种启示,即对于铣刀状态的在线监测并不需要分析整个频率范围内的所有振动信号,而只需了解对铣刀状态变化最敏感的特征频段范围内的振动信号变化情况。

## 2.2 硬件比较监测策略

由于在数字式功率谱密度函数分析中存在着计算精度和实时性的矛盾,直接计算铣削振动信号的功率谱密度并根据运算结果来监测刀具的磨损状态是不可能的<sup>[2]</sup>。由帕斯瓦尔(Parseval)定理可知,同一个信号在时域中所包含的总功率,应等于其在频域中所包含的总功率,其间关系可表示为

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

其中 $f(t)$ 为有限长非周期信号,  $|F(\omega)|^2$ 为能量密度频谱函数<sup>[2]</sup>。据此可制订出基于铣削振动时域信号的监测策略。即通过监测特征频段范围内的振动时域信号强度或幅值的变化来在线地辨识刀具磨损或破损的当前状态。

另外,由香农(Shannon)采样定理知,在信号分析中的采样频率至少应为被分析信号频率的两倍以上,否则将会产生信号混迭现象。由于特征频段通常位于较高频率处,因此A/D板的采样转换频率一般都无法满足所要求的采样频率。在此,根据铣削振动时域和频域信号分析的结果,我们首先采用了一个高通滤波器以滤去由于间断性端铣冲击而造成的低频振动信号,然后利用一个自行设计的硬件比较电路在线地监测振动时域信号的幅值变化,此即硬件比较监测策略。

综上所述,基于铣削力信号变化的时段比值监测策略和基于铣削振动信号变化的硬件比较监测策略均已在以APPLE-II微型机为中心的监测系统上实现。

## 参 考 文 献

1. Tlustý J., Andrews G. C. A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *Annals of the CIRP*, 1983, 32(2): 563~572
2. 章建. 铣削过程刀具磨损和破损在线监测理论和试验技术的研究. 南京航空学院博士学位论文, 1990

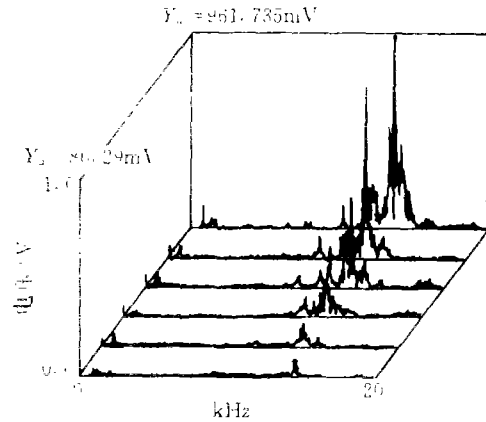


图4 特征频段内铣削振动信号能量增长趋势