

# 机械故障诊断学的理论及其应用

## 第四讲 机械制造过程的监测与诊断

### Topic 4 Monitoring and Diagnosis for Manufacturing Engineering

**摘要** 随着柔性制造系统（FMS）和集成制造系统（CIMS）的发展，机械制造过程的工况监测与故障诊断日渐重视。本文通过切削刀具磨损的状态识别方法给出了机械制造过程的工况监测与诊断方法。

**关键词：**刀具磨损，聚类，判别函数

在传统的机械加工环境中，以人为主体，机械制造过程的工况状态可以很容易进行判断。但随着柔性制造系统和集成制造系统的发展，自动化程度日益提高，对工况监测与故障诊断也日渐重视，并成为实现机械制造过程自动化、少人化或无人化的重要技术保证。

#### 1 机械制造过程工况监视与故障诊断的特点

机械制造系统的动态特性有以下特点：**(a)** 离散性与断续性。就制造系统而言，信息的主要形式是离散的，如零件尺寸、加工精度以及各种经济与技术数据等等。就加工过程而言，在一次走刀中的切削加工可以是连续的（如车、钻、磨等），也可以是断续的（如铣）；从一个零件的制造过程而言，工序与工序是两个相互独立的过程，而对加工质量为说，工序与工序又是相关的；**(b)** 缓变性与突变性。在固定的加工条件下，一台机床的动态特性是缓变的，如机床的温升、零件磨损、应力的分布等都是缓变过程；而如刀具损坏、折断等往往是在瞬间出现的，则属于突变性故障；**(c)** 随机性与趋向性。由于机械加工过程中的随机因素干扰大，因此机械加工过程中各种物理量的变化，如切削力、切削温度、刀具磨损与刀具寿命和切削条件的关系往往是含有趋向性的随机过程；**(d)** 模糊性。在现象与因素关系上，大部分呈模糊性，即一部分因果关系是透明的，而另一部分是黑色的。在工况分析中需要用到各种建模方法，没有适用于各种情况的通用数学模型。本文以刀具磨损的状态的监测与诊断方法为例说明机械制造过程工况的监视与诊断方法，其他如切削过程颤振、切屑状态、磨削烧伤、工序尺寸精度等的监测与诊断方法见文献<sup>[1]</sup>。

#### 2 切削过程刀具磨损的状态识别

##### 1) 监视信号选择与实验分析系统

振动信号是一种信息载体，其突出优点是频响范围宽，对切削过程中的异常现象反映敏感，受环境条件限制较少，检测装置比较简单，安装灵活，在生产条件下容易实现。根据比较分析，选择刀杆垂直方向振动加速度作为监测参数，用压电式加速度传感器拾取。检测和分析系统如图 1 所示。切削条件是刀具角度为  $\gamma_0 = 12^\circ$ ,  $\alpha_0 = 7^\circ$ ,  $\lambda_s = 0^\circ$ ；工件材料为 45 钢；切削用量是  $a_p = 2\text{mm}$ ,  $f = 0.301\text{mm}/r$ ,  $v = 7500\text{m}/s$ 。

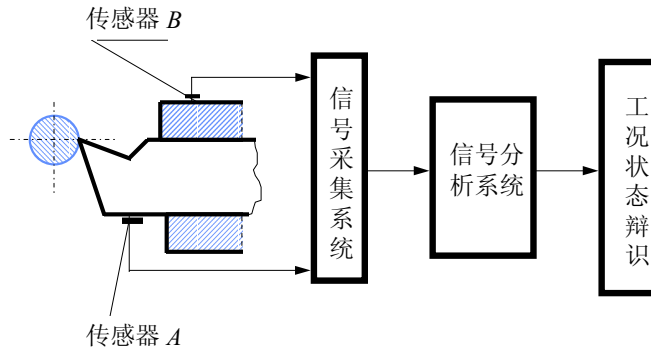
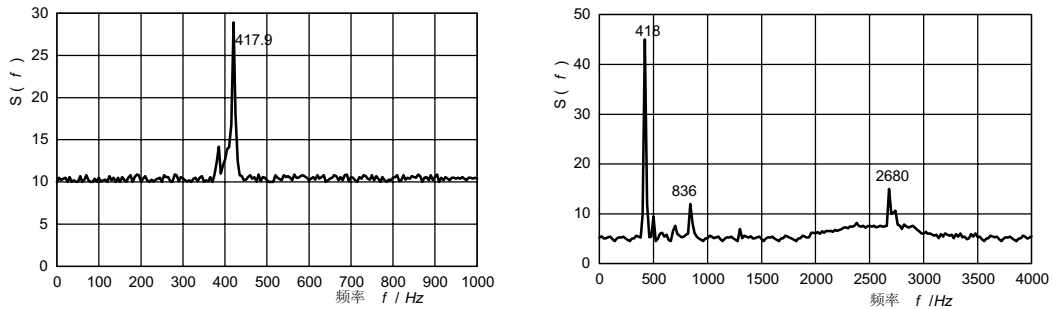


图 1 刀具磨损测试示意图

## 2) 刀具磨损过程的频谱特征

切削过程中的刀具磨损使切削力发生变化，势必影响到刀杆系统振动参数的变化。由传感器检测到的原始信号是随机的，很难直接用于状态识别，需要通过第三讲所述的特征分析方法找出能够反映刀具磨损状态变化的特征量。图 2 为其频谱特征变化图，当机床空转时，机床系统的振动频率为  $417.9\text{ Hz}$  (图 2a)，当刀具接触工件时，由于刀具与工件之间的摩擦使刀具与工件连成一体，和刀具没有与工件接触时比较，显然机械系统振动模态已经发生了变化，旁瓣开始发展(图 2b)，随着进给量的加大，旁瓣位置向低频方向移动。



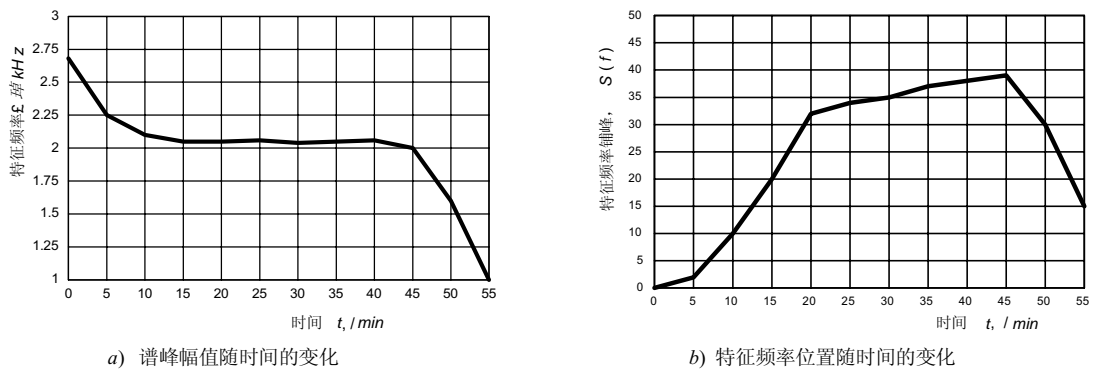
a) 空载时的功率谱图

b) 刀具磨损功率谱图

图 2 刀具磨损过程的功率谱变化

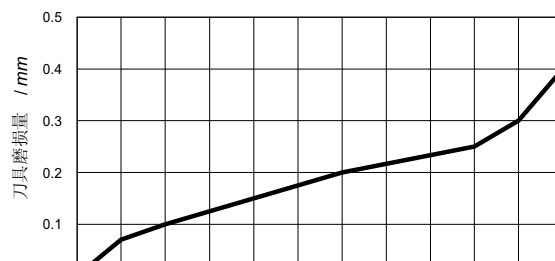
图 3 表示频谱参数随时间的变化规律。刀杆的振动固有频率是在高频段（本例试验条件下约为  $3000\sim 4000\text{ Hz}$ ），因此，可以认为高频段频谱特性的变化是刀具磨损通过切削力激发刀杆振动模态参数变化所造成的，且同前刀面与切屑的接触长度和后刀面与工件表面的摩擦面长度的变化有关。谱峰幅值和频率的变化趋势与刀具磨损过程的规律性也更为一致，尤其是从正常磨损阶段向急剧磨损阶段过渡或是刀具即将发生破损时，频谱特性的变化相当显著。

应该指出，振动加速度信号的频谱特性必然与切削条件及刀具—工件—机床加工系统的振动模态有关，如果切削条件和加工系统不同，则频谱特征将有区别。



a) 谱峰幅值随时间的变化

b) 特征频率位置随时间的变化



c) 刀具磨损随时间的变化

图 3 特征频率与谱峰的变化和刀具实际磨损规律的比较

### 3) 刀具磨损过程的时序模型分析

由第三讲知：时序模型的结构、参数、残差及其特性函数都能表达动态过程的特征。图 4 和图 5 分别表示了自回归模型参数（见第三讲式（2））和残差平方和与刀具磨损过程之间的关系。它们都能反映刀具磨损的变化规律，当刀具进入急剧磨损区时，刀具与工件接触状态的变化使数据间相关性增大（刀具如崩刃则相关性变小），故急剧增大（刀具崩刃则急剧减小）；又因切削条件的恶化使随机成分增加，从而使之增大。

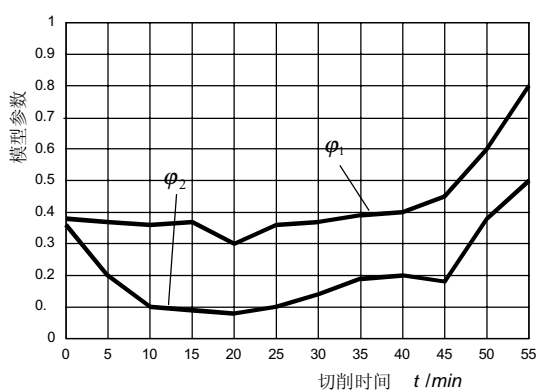


图 4 AR 模型参数随时间的变化

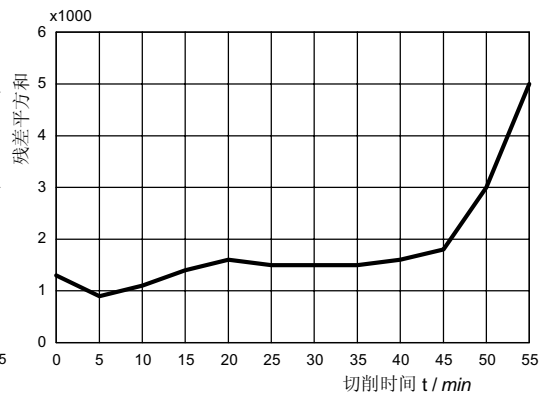


图 5 残差平方和时间的变化

### 4) 刀具磨损过程的统计特征分析

很多时域统计特征量均与刀具磨损状态相关，其中特别是二阶矩统计特性对刀具磨损状态变化的反映最为敏感。图 6 和图 7 分别是一步自相关函数和样本方差在刀具磨损过程中的变化曲线，这种变化反映了由于刀具磨损导致的信号能量的变化，与频谱特性所表达的规律性是一致的。但应该注意的是，这些图形是取间断取样得到的，由于刀具磨损过程的波动性较大，在连续切削过程中，上述特征量的变化也呈现出波动性，但其变化趋势是一致的，尤其是刀具从正常磨损向急剧磨损过渡阶段以及发生崩刃时，这种变化特征是相当显著的。由前述时域、频域和统计特性分析可以看出，在刀具正常磨损状态(含初期磨损)和异常磨损状态(包括急剧磨损和破损)之间，有关特征量的变化趋势图上均有一个与刀具磨损过程变化特性相对应的转折点(图 4~7)，初看上去，这个转折点可以用来作为状态分类的门限值，但实际上此转折点是随机的，它是一个过渡区；即使是在相同的切削条件下，由于工件和刀具材料的不均匀性，以及加工系统和外界环境的随机干扰，对于不同的实现，其转折点也是不确定的。显然，若用某一过程的转折点作为门限值去决定另一过程的磨损状态，误判率是很大的，因此，还需应用这些特征量构成模式空间，在此基础上研究状态识别的方法。

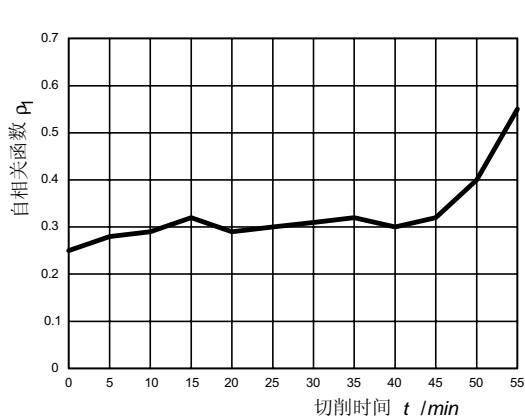


图6 一步自相关函数随时间的变化

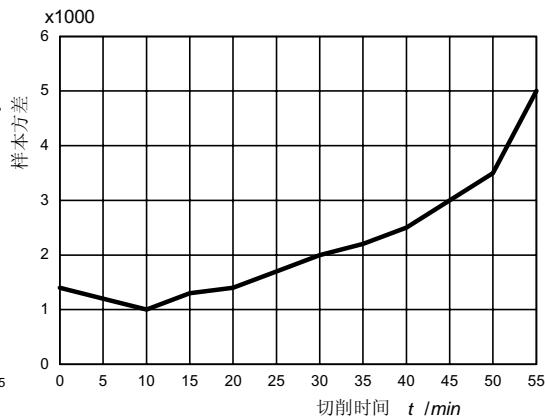
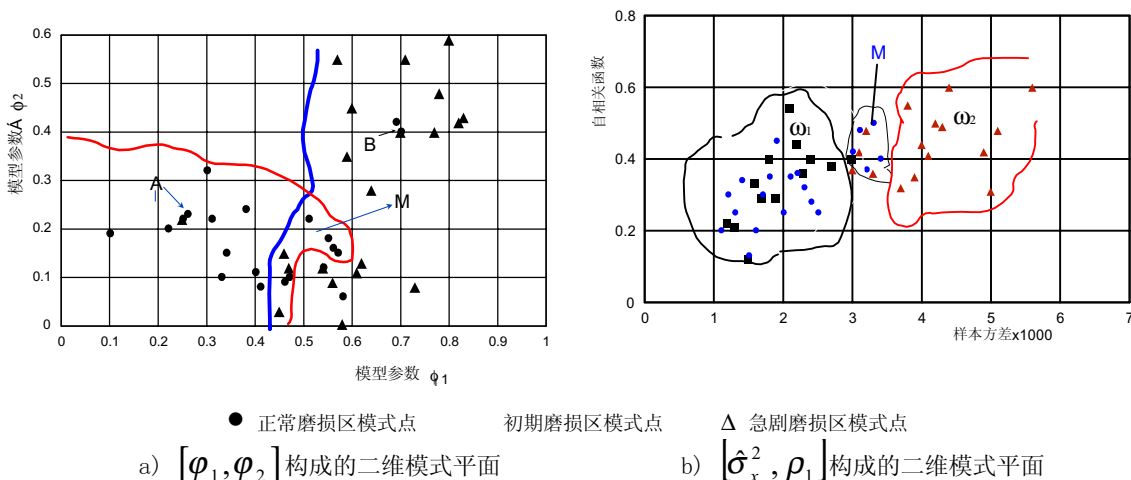


图7 样本方差随时间的变化

## 5) 刀具磨损状态判别函数的选择

### (1) 刀具磨损的聚类分析

在模式空间里，同类模式都具有聚类性，但不同的特征量所构成的聚类的可分性并不相同。图 8a 是用  $AR$  模型参数  $[\varphi_1, \varphi_2]$  构成的二维模式平面，可见其聚类性是存在的，但正常磨损区和异常磨损区可分性很差，有较大的模糊区，不同的类型的模式点甚至有重叠，如图中的  $A$ 、 $B$  点所示。图 8b 为统计特征量样本方差与一步自相关函数  $[\hat{\sigma}_x^2, \rho_1]$  构成的二维模式平面，其聚类性与可分性则较好，可以表达不同磨损情况下信号能量的分布状态；并且初期磨损区的模式点和正常磨损区的模式点基本上是属于一个聚类域。另一方面，这两个特征量可由原始样本直接得到，实时性较好。



a)  $[\varphi_1, \varphi_2]$  构成的二维模式平面

b)  $[\hat{\sigma}_x^2, \rho_1]$  构成的二维模式平面

图8 二维模式向量的聚类分布图

### (2) 刀具磨损状态分类判别函数的选择

判别函数的种类及形式很多，但不是所有判别函数都适用于判别刀具的磨损状态，需要根据加工条件进行具体分析。例如距离函数<sup>[1]</sup>，在许多故障诊断技术中都得到成功的应用，但将其用于判别刀具磨损状态时，却存在一定的困难，这主要是因为判别时需要事先确定与刀具磨损状态相对应的参考模式。在生产条件下实现距离函数分类，会产生以下问题：

1) 在实时在线的条件下，正常磨损状态的参考模式可以在加工过程中求得，而急剧磨损状态或破损状态的参考模式则很难确定，一旦进入急剧磨损状态或破损状态时，刀具已不能使用，工件也成为废品，此时再进行判别，已成为“事后判别”，而不能做到“事前预报”；

2) 用实验方法虽可求出某种切削条件下刀具磨损状态的参考模式，但由于刀具材料、工件材料以及其他切削条件的随机性均较大，即切削过程的每一次实现，其物理背景都不

尽相同(不属于同一母体), 误判率必然很大。

因此, 必须选择合适的判别函数。研究表明, 模糊聚类、贝叶斯判别方法<sup>[1]</sup>均可考虑用于刀具磨损状态的识别。以下介绍一种基于统计原理的分类方法, 其基本思路是: 如果在切削过程中通过自学习确定并不断修正正常工况的类中心, 并根据统计规律给出待检点到类中心距离的门限函数, 在门限内的模式样本聚为一类, 超过门限则认为该模式发生显著变化, 判为异常, 则在线监控即可实现。这里假设正常磨损阶段的一步自相关函数和样本方差均近似服从于正态分布。根据数理统计理论和先验知识, 当待检模式满足以下条件:

$$\frac{\hat{\sigma}_x^2}{\bar{\sigma}_x^2} \geq 1.96, \quad \frac{|\hat{\rho}_1 - \bar{\rho}_1|}{\sigma_{\rho_1}} \geq 1.96$$

就认为模式相对于正常磨损状态所对应的模式发生显著变化, 即刀具处于异常(急剧磨损或破损)状态。上式中  $\bar{\sigma}_x^2$  为方差均值,  $\bar{\rho}_1$  为一步自相关函数均值,  $\sigma_{\rho_1}$  为  $\rho_1$  的方差。在实际应用中可以用单片机实现低成本的刀具磨损实时在线监测诊断。

以上通过切削刀具磨损的状态识别过程给出了机械制造的工况监测与诊断方法, 指出在选择了合适的特征量之后, 还必须进行特征分析, 并与系统的物理背景起来, 研究它的变化规律, 才能获得合适判别函数。

#### 参考文献

- 1 钟秉林, 黄仁、贾民平等, 机械故障诊断学, 北京: 机械工业出版社, 1997年12月
- 2 陈克兴, 李川奇, 设备状态监测与故障诊断技术, 北京: 科学技术文献出版社, 1991年8月
- 3 Harris, C. M. (ed.), *Shock and Vibration Handbook, Fourth Edition*, McGraw-Hill, New York, 1996