

刀具磨损监测的随机向量相关度量法

温熙森 唐丙阳

胡鸢庆 李少民

(精密机械与仪器系)

摘要 本文提出了一种运用功率累积和与 n 维随机向量相关度量监测刀具磨损的新方法,即通过计算刀具三向振动加速度的相关度量系数,主轴扭矩或某项振动加速度的功率累积和综合监测刀具的磨损、破损以及刀具磨损的程度。该法在简单性、可靠性等方面比以往提出的方法有较大的进步,因而使得本方法具有很大的应用前景。文中对该法的理论基础进行了严格的证明,并给出了实验论证结果。

关键词 刀具磨损,监测,随机向量相关

分类号 TH165.3

随着现代生产的自动化、柔性化及集成化程度的不断提高,为保证工件的加工精度、表面质量和生产设备的安全以及合理地使用刀具,从而达到较高生产效率和生产效益,必须对刀具的切削状况进行实时监测。

近几十年来,虽然国内外学者已提出了许多有价值的方法,但是由于切削过程的复杂性,实际应用的效果仍然不能令人满意。主要原因是:(1)机床结构动态特性的复杂性,切削用量的不断变化,工件及刀具材料的不同,刀具几何参数的不同等都将影响着各方面所作出的判断;(2)即使通过大量的统计实验来获得各种信号的分布特征,但由于信号分布之广,影响因素之多,使得各方法很难对不同的加工条件设置合适的监测阈值,(3)切削过程中切屑及冷却液的存在,使得一些方法无法实时应用。

鉴于以上原因,一个有效的监测方法应该不受或尽量少受切削条件的影响,且能综合反映切削状态的信息。为此,本文提出了一种新的刀具磨损监测方法(N 维随机向量相关度量法),即运用 N 维随机向量相关度量法求三向加速度的相关系数和主轴扭矩信号(或某向加速度信号)功率谱图中的功率累积和,共同综合判断刀具磨损。

* 本文为国家高技术基金资助项目

1989年10月5日收稿

1 N 维随机向量相关度量法

首先对相关系数的数学定义作如下说明：

设 x_i 是 $p_i \times 1$ 的随机向量, $i=1, 2, \dots, n$, 记 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 是 $p \times 1$ 的随机向量

$$P = \sum_{i=1}^n p_i$$

据线性代数理论, 假定 $E(x) = 0$, $\sum = Exx'$ 存在, $\text{Cov}(x_i, x_j)$ 是非退化矩阵, 记

$$\sum_{ij} = \text{Cov}(x_i, x_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

即假定 \sum_{ij} 均为正定阵, 用 $\sum_{ii} > 0$, $i=1, 2, \dots, n$ 表示, 此时

$$\sum = E_{xx'} = \begin{pmatrix} \sum_{11} & \sum_{12} & \dots & \sum_{1n} \\ \sum_{21} & \sum_{22} & \dots & \sum_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{n1} & \sum_{n2} & \dots & \sum_{nn} \end{pmatrix}$$

记

$$D^2 = \left| \sum \right| / \prod_{i=1}^n \left| \sum_{ii} \right|$$

$$R^2 = 1 - D^2$$

R^2 的算术平方根记为 R , R 称为 x_1, x_2, \dots, x_n 的相关系数。

若定义对于不同时刻 $t_1, t_2 (t_2 \geq t_1)$, 刀具的磨损量的增量为 $\Delta\omega$, 多组向量相关性度量的增值为 $\Delta R (R = R_2 - R_1)$, 则当 $\Delta\omega = 0$ 时, 称为理想切削状态。

据此, 有必要作如下的假设:

(1) 切削是在同一状态下进行的, 即切削参数、机床本身的特性和传感器及辅助装置的特性不变。由此可以认为每个环节间的传递函数 H 基本保持不变。

(2) 刀具在纯磨损时, 在任一无限短的时间 ε 内, 加速度 a 的增量为 Δa , 且假设其方差足够小 ($D(\Delta a)$)。

定理 刀具磨损时 $\Delta R > 0$; 刀具破损时, $\Delta R < 0$ 。

相关度量系数 R 是描述三向加速度 a_x, a_y, a_z 的相关性的一种度量, 由于 a_x, a_y, a_z 是三个性质相似的量, 在 R 和 ΔR 的计算式中占有同等的地位, 所以只须以 a_x, a_z 为例进行证明即可。

证明 1) 首先证明刀具纯磨损时, $\Delta R > 0$, 假设此时没有破损现象发生。

根据上面的假设, 有

(a) $H = C$, C 是常数; (b) $D(\Delta a_x), D(\Delta a_y), D(\Delta a_z)$ 足够小。

当刀具无磨损时 ($\Delta\omega = 0$), 切削状态下的加速度传递函数框图如图1, 其中, H_z 为 a_z 的加速度传感器的传递函数, N_x, N_y 分别为测量噪声, H_{xy} 为 a_x 与 a_y 间的传递函数, A_x, A_y 为理论上的切削加速度。

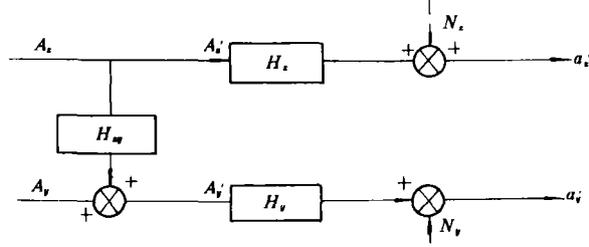


图1 刀具未磨损时的加速度传递函数

由图1可得下式

$$a_z = A_z \cdot H_z + N_z \quad (1)$$

$$a_y = (A_y + A_z H_{zy}) \cdot H_y + N_y \quad (2)$$

当刀具有磨损量 $\Delta\omega$ 时, a_y 和 a_z 分别产生一增量 Δa_y 和 Δa_z , Δa_z 与 Δa_y 间传递函数为 H_r , 其切削状态下的加速度传递函数框图如图2.

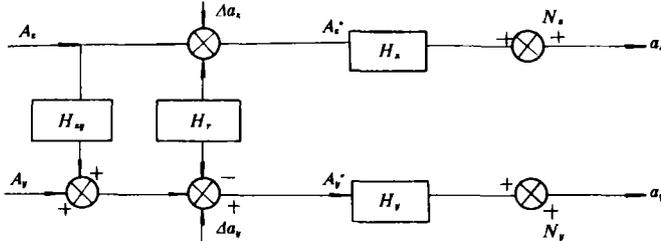


图2 刀具磨损时的加速度传递函数

由图2可得下式:

$$a_z = (A_z + \Delta a_z) \cdot H_z + N_z = a_z + \Delta a_z H_z \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_y &= (A_z H_{zy} + A_y + \Delta a_z H_r + \Delta a_y) \cdot H_y + N_y \\ &= a_y + h_y \Delta a_y + H_r H_y \Delta a_z \end{aligned} \quad (4)$$

据多组向量相关度量理论: $D^2 = \left| \sum_{i=1}^n \left| \prod_{i=1}^n \right| \sum u_i \right|$

当刀具无磨损时, 有:

$$D_N^2 = \left| \begin{array}{cc} \text{Cov}(a_z, a_z) & \text{Cov}(a_z, a_y) \\ \text{Cov}(a_y, a_z) & \text{Cov}(a_y, a_y) \end{array} \right| \left/ \left| \text{Cov}(a_z, a_z) \text{Cov}(a_y, a_y) \right| \right.$$

当有磨损时

$$D_Y^2 = \left| \begin{array}{cc} \text{Cov}(a_z, a_z) & \text{Cov}(a_z, a_y) \\ \text{Cov}(a_y, a_z) & \text{Cov}(a_y, a_y) \end{array} \right| \left/ \left| \text{Cov}(a_z, a_z) \text{Cov}(a_y, a_y) \right| \right.$$

据已知假设条件:

$$\text{Cov}(\Delta a_z, \Delta a_z) = 0, \text{Cov}(a_z, \Delta a_z) = 0$$

并记, $\Delta a_y \cdot H_y = \Delta a_y$, $\Delta a_z \cdot H_z = \Delta a_z$

可推得:

$$\Delta R = R_y - R_N = \frac{\text{Cov}(\Delta a_z, \Delta a_y)}{\sqrt{|\text{Cov}(a_y, a_y)\text{Cov}(a_z, a_z)|}}$$

据1)知: 刀具磨损时, Δa_y 愈来愈大, Δa_z 也愈来愈大, 从而 $\Delta R > 0$.

2) 最后证明刀具破损量, $\Delta R < 0$.

此时, $D(\Delta a_z), D(\Delta a_y), D(\Delta a_x)$ 不一定足够小.

同样地可得到下式:

$$\Delta R = \frac{\text{Cov}(\Delta a_y, \Delta a_z)}{\sqrt{|\text{Cov}(a_y, a_y)\text{Cov}(a_z, a_z)|}} + \left[\frac{\text{Cov}(a_y, a_z)}{\sqrt{|\text{Cov}(a_y, a_y)\text{Cov}(a_z, a_z)|}} \frac{\text{Cov}(a_y, a_z)}{\sqrt{|\text{Cov}(a_y, a_y)\text{Cov}(a_z, a_z)|}} \right] \triangleq A + B$$

显然 $B < 0$.

据1)知: 刀具破损时, 相当于换把新刀, Δa_y 愈来愈大, Δa_z 愈来愈小, $\text{Cov}(a_y, a_z) < 0$, 即 $A < 0$. 故 $\Delta R = A + B < 0$.

根据上述推导可得如下结论:

(a) 当刀具磨损时, 相关系数 R 增加; (b) 当刀具破损时, 相关系数 R 减少.

2 判据的设定

为了有效地划分刀具磨损的三个阶段: 初期磨损阶段, 正常磨损阶段和激剧磨损阶段. 本文引进功率累积和算法.

[3] 中曾证明: $\sum_{i=1}^n p_i \propto \omega_n$.

式中, $\sum_{i=1}^n$ 是功率和, ω_n 为磨损量. 为了反映刀具的切削能量的变化情况, 可以采用计算功率谱累积和来反映不同时刻的状态, 功率谱从 0 到 Ω_{Hz} 的能量 X_t , 表示为^[3]

$$X_t = \int_0^{\Omega} |p(f)|^2 df$$

离散形式

$$X_t = \sum_0^{\Omega} |p(f)|^2 \Delta f$$

对于同一采样频率, 同一分辨率的功率谱, Δf 不变, 可用 $X_t = \sum_0^{\Omega} |p(f)|^2$ 描述上式. 则功率累积和为

$$S_t = \sum_{r \leq t} (X_r - R)$$

式中, R 为平均量, 即进行特定试验所得的平均功率. S_t 与 $\sum_{i=1}^n p_i$ 成正比, 所以 S_t 与 ω_n 亦成正比.

通过上述关系可划分刀具磨损的三个阶段:

$\Delta\dot{\omega}_r > 0$, 刀具进入激剧磨损阶段, $\Delta\dot{\omega}_r < 0$, 刀具处于正常磨损或初期磨损。式中 $\Delta\dot{\omega}_r$ 为 S_r 的斜率增量。

综上所述, 可得刀具失效的判据如下:

$\Delta R < 0$	$\Delta\dot{\omega}_r > 0$	刀具重磨或换新刀
$\Delta R < 0$	$\Delta\dot{\omega}_r > 0$	刀具破损
$\Delta R > 0$	$\Delta\dot{\omega}_r < 0$	刀具正常磨损
$\Delta R > 0$	$\Delta\dot{\omega}_r > 0$	刀具进入激剧磨损

对于绝大多数刀具磨损监测方法来说, 一般都存在着阈值的设定问题。本文提出的相关度量法采用了灰色预测模型, 只需设置一个相对阈值即可。设已得到序列 $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n$, 经过灰色预测, 得到 $\Delta\omega'_n$ 。当得到了第 $n+1$ 个点的实测值 $\Delta\omega_{n+1}$ 时, 可以作如下计算

$$\lambda = \frac{|\Delta\omega_{n+1} - \Delta\omega'_n|}{\Delta\omega_{n+1}}$$

设置相对值 $[\lambda]$, 当 $\lambda \leq [\lambda]$, 刀具处于正常状态; 当 $\lambda > [\lambda]$, 刀具失效。

3 实验验证

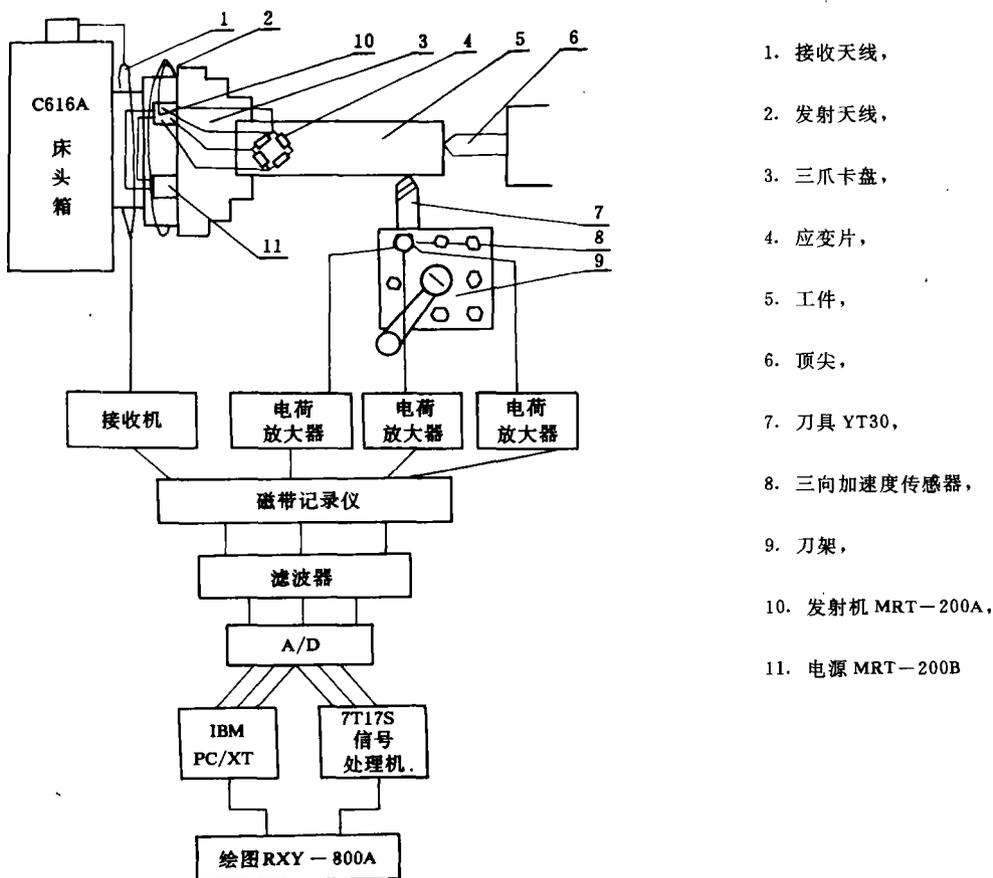
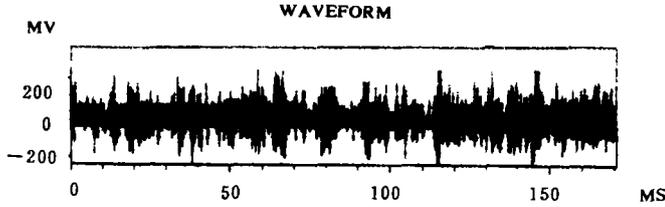


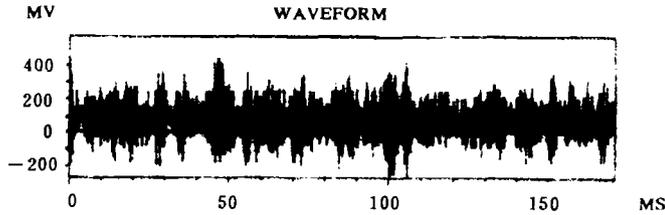
图3 实验系统框图

根据上面介绍的相关度量法及判定准则，我们进行了一系列刀具磨损监测实验，图3是实验系统，加速度信号由 B&K4321 加速度传感器检出，经电荷放大和滤波后，即可在现场采样，用 IBM-PC 机进行在线分析，又可将信号由磁带记录仪记录后由 7T17S 信号处理机进行离线分析。

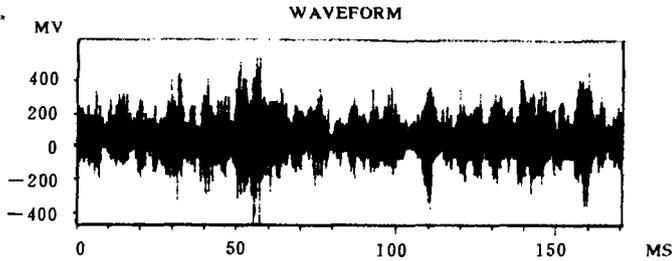
根据本法我们进行了一系列的实验，限于篇幅，在此只举例加以论述，下面是一次实验的结果。图4为走刀方向振动加速度的时域波形图，图5为其功率谱图。



(a) 初期磨损时

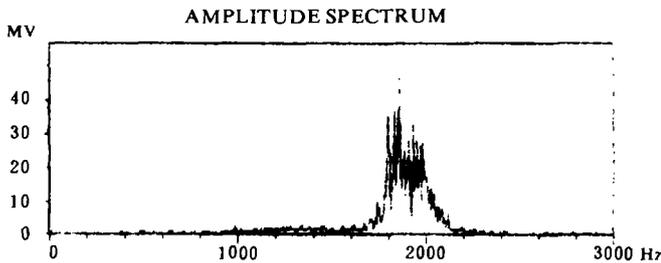


(b) 正常磨损时

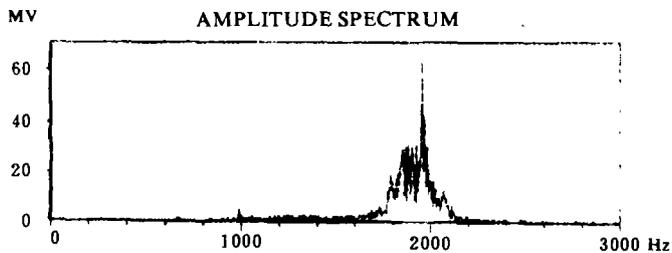


(c) 急剧磨损时

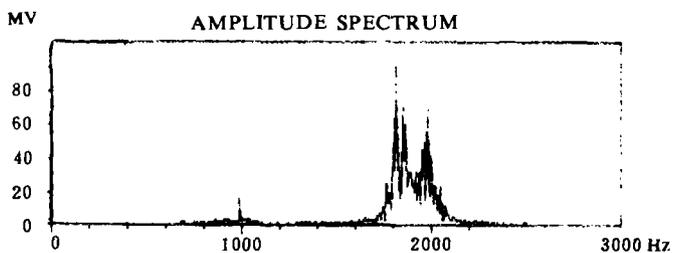
图4 走刀方向加速度的时域信号



(a) 初期磨损时



(b) 正常磨损时



(c) 急剧磨损时

图5 刀具走刀方向振动加速度谱图

由实验可得到下列的功率累积和图，多维相关系数图和功率累积和斜率增量图（图6，7，8）。

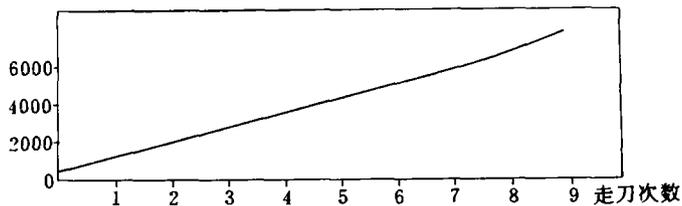


图6 功率累积和图

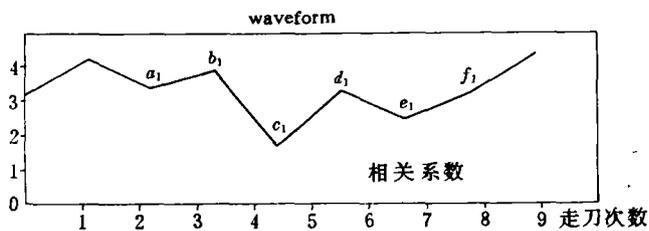


图7 多维相关系数图

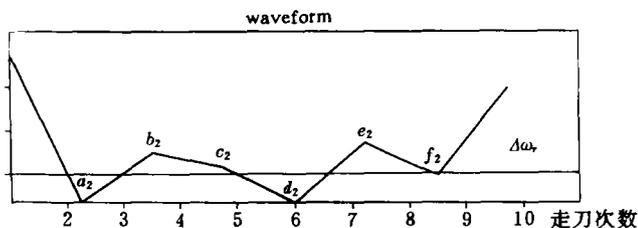


图8 功率累积和斜率增量图

则由上述图6、图7和图8并参考图4和图5可得如下结论：

- (1) a_1 点之前，刀具处在初期磨损阶段；
- (2) c 点刀具出现破损；
- (3) $c-d$ 段刀具处在正常磨损阶段；
- (4) $d-e$ 段刀具出现破损；
- (5) f 点，刀具即将进入剧烈磨损阶段。

以上各结论与实际情况完全一致。在实验中，我们通过 MN6-2 读数显微镜来观察刀具后刀面的磨损情况证实了这一点。

4 结论

本文是对相关度量法监测刀具磨损的初次探讨。理论分析及实验论证可看出： n 维随机向量相关性度量可以用于诊断刀具的失效。这给刀具磨损的监测提供了一种新的手段。概言之，本法具有如下特点：

- (1) $\Delta R > 0, \Delta \omega_r < 0$ ，刀具处于正常磨损状态； $\Delta R > 0, \Delta \omega_r > 0$ ，刀具将进入急剧磨损状态。
- (2) 设置相对阈值综合判断精度高。
- (3) 该法对仪器的使用要求低，因相关系数 R 为无量纲量，因此可不考虑放大器等增益，都能得到一致的 R 。

由于这些特点，相关度量法具有较大的应用发展前景。

本文的完成得到了张绪强高级工程师和郑磊同志的热心帮助，在此对他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 周泽华. 金属切削原理. 机械工业出版社, 1983
- [2] 吴雅等. 灰色预测和时序预测的探讨. 华中理工大学学报, 1988, 16(3)
- [3] Constantindes N and bennett S. An Investigation of Methods for the On-Line Estimation of Tool Wear. Int. J. of Mach. Tools & Manufacture, 1987, 27 (2); 225-237
- [4] 张尧庭, 朱晓冬. 随机向量相关性度量. 应用概率统计, 1988, 4(1)
- [5] Del Taglia A. An Approach to On-Line Measurement of Tool life wear by Spectrum Analysis. Proc. of 17th MTDR Conf, 1976

- [6] 曲绚, 唐丙阳, 温熙森. 机械振动特征分析中的信号处理技术与微机特征分析系统. 国防科技大学学报, 1989, 11(3)
- [7] Hans-Jürgen. On-Line Forecast and Detection of Cutting Tool Failure in the Integrated Development of the System of Machine Tool. proc. of 5th ICPE, Tokyo, 1984
- [8] 刘经燕, 杨叔子等. 刀具磨损的信号功率谱分析与监视. 华中工学院学报, 1985

Monitoring Cutting Tool Wear with Correlation of Random Variables

Wen Xisen Tang Bingyang
Hu Niaoqing Li Shaoming

(Department of Precision Mechnery and Instrument)

Abstract

At present, monitoring cutting tool wear becomes one of the most important problems to be solved urgently in automatic manufacturing. For this a new monitoring method is proposed using correlation of N dimensional Random Variables and cumulative power sum, namely comprehensively monitoring cutting tool wear and leakage by acquiring the correlation coefficient of vibration accelerations in three mutually perpendicular directions, and the cumulative power sum about torque of spindle or about any vibration acceleration. This method makes greater progress than the ones proposed before in the aspects of reliability and simplicity. So it has a bright future in application area. The theoretical basis of the method is strictly proved and some experimental results are given in this paper.

key words monitoring, cutting tool wear, correlation of random variables