

基于小波分析和模糊控制理论的铣刀磨损监控方法

□马建峰 王信义

摘要 研制了一种铣刀磨损的监控方法。在该系统中信号采集采用声发射传感器,信号的特征提取采用小波分析的方法,将变换后的尺度系数和各个频段的小波系数作为特征,采用自行设计的 Sugeno 模糊控制系统进行状态识别,模糊控制系统的输出是刀具磨损的具体值。

关键词: 铣刀磨损 小波分析 模糊控制器

中图分类号: TB24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671—3133(2001)10—0038—03

Tool wear monitoring on milling based on wavelet analysis and fuzzy control theory

□Ma Jianfeng, Wang Xinyi

Abstract This paper develops a method to monitor the tool wear on milling. In this paper, we use an acoustic emission sensor for signal acquisition; use wavelet transform for signal feature extraction, the features is the scaling coefficient and the wavelet coefficients of AE signal; employ Sugeno fuzzy controller to recognize the features above corresponding to different amount of tool wear, the output of the controller is the tool wear(in mm).

Key words: Tool wear of milling tool Wavelet analysis Fuzzy controller

刀具的磨损与破损监控检测系统一般由信号检测、特征生成(信号处理)与特征提取、状态识别、决策

2.079, $C_{Y_e} = 0.02$, $Y_u = 1.025$, $Y_F = 2.05$, $Y_{End} = 1.24$,
 $Y_B = 0.705$, $\mu_t = 3$, $\Delta\epsilon = 0.3$, $K_{\Delta\epsilon} = 0$, $C_{2,\mu\epsilon} + K_{\Delta\epsilon} = 0.01$

2. 计算弯曲模糊可靠度 R_F

把相关系数代入式(5)、式(6)、式(7)求得:

$$\overline{\sigma}_F = 314.3\text{MPa} \quad C_{\sigma_F} = 0.062$$

$$\sigma_{\sigma_F} = C_{\sigma_F} \overline{\sigma}_F = 19.49\text{MPa}$$

据式(12),许用弯曲应力 $[\sigma_F]$ 约为 325MPa 的隶属函数为:

$$\mu_A(\sigma_F) = \begin{cases} 1 & \sigma_F \leq 325 \\ (400 - \sigma_F)/(400 - 325) & 325 < \sigma_F \leq 400 \\ 0 & \sigma_F > 400 \end{cases}$$

把 $\overline{\sigma}_F$, σ_{σ_F} , C_{2F} ($= 400\text{MPa}$), C_{1F} ($= 325\text{MPa}$)代入式(13)得:

$$R_F = 0.979$$

3. 计算接触模糊可靠度 R_H

把相关系数代入式(8)、式(9)、式(10)求得:

$$\overline{\sigma}_H = 509\text{MPa} \quad C_{\sigma_H} = 0.0636$$

$$\sigma_{\sigma_H} = C_{\sigma_H} \overline{\sigma}_H = 32.3724\text{MPa}$$

据式(12),许用接触应力 $[\sigma_H]$ 约为 566MPa 的隶属函数为:

$$\mu_A(\sigma_H) = \begin{cases} 1 & \sigma_H \leq 566 \\ (651 - \sigma_H)/(651 - 566) & 566 < \sigma_H \leq 651 \\ 0 & \sigma_H > 651 \end{cases}$$

把 $\overline{\sigma}_H$, σ_{σ_H} , C_{2H} ($= 651\text{MPa}$), C_{1H} ($= 566\text{MPa}$)代入式(13)得:

$$R_H = 0.994$$

4. 双圆弧齿轮的模糊可靠度

$$R = R_F R_H = 0.979 \times 0.994 = 0.973$$

由文献[6]用传统方法计算所得的可靠度为:

$$R = R_F R_H = 0.992 \times 0.9963 = 0.988$$

三、结论

1. 设计中难以精确确定的载荷及疲劳强度等都可模糊集合来表述。模糊可靠度是在模糊条件下不失效的概率。

2. 将概率密度函数与隶属函数结合起来,可求得模糊事件的概率,从而很容易得到模糊可靠度 R 。

3. 实际计算表明,将模糊数学引入齿轮强度的可靠性设计是可行的。与常规计算相比,由于考虑了各参数的离散性和模糊性,计算结果更接近客观实际,更具实用价值。

参 考 文 献

- 1 王彩华.模糊论方法学.北京:中国建筑工业出版社,1986
- 2 邵家辉.圆弧齿轮(第二版).北京:机械工业出版社,1994
- 3 武宝林.双圆弧齿轮接触疲劳强度的可靠性试验与研究. [太原工业大学研究生毕业论文],1991
- 4 王超.机械可靠性工程.北京:冶金工业出版社,1992
- 5 陈湛国.双圆弧齿强计算方法综合报告.哈尔滨工业大学,1986
- 6 关辉.齿轮可靠性设计讲座(二).齿轮,1984,6

作者通讯地址:太原理工大学齿轮研究所(030024)

收稿日期:20010315

控制 4 个部分组成。特征提取主要方法有：信号的时域及基于时序建模的特征生成、基于信号的常规谱分析的特征生成、基于小波变换 (Wavelet Transform) 的特征生成、分形与混沌特征生成。其中小波变换生成的特征由于在时域和频域内都具有良好的分辨率，并且可在不同频段提取信号的时域特征，该方法在信号特征的提取中得到了广泛的应用^[1,2,3]。

刀具磨损状态识别主要方法有：经典统计模式识别 (基于贝叶斯估计)、决策树、专家系统、子空间法模式识别、模糊逻辑分类和人工神经网络^[3]。

在本研究中，特征生成采用小波分析的方法，状态识别采用自行设计的 Sugeno 模糊控制系统直接得到刀具的磨损值。决策控制是通过一块 PC 机接口板来实现，该接口板的功能包括命令的下传 (从微机传至机床) 和刀具状态的上传。

一、小波变换和特征生成

1. 小波变换 小波变换在时频平面的不同位置具有不同的分辨率，是一种多分辨率的分析方法。

定义 1: 设函数 $\Psi \in L^2(R) \cap L^1(R)$ ，并且满足容许条件式 (1)，则称 Ψ 为容许 (连续) 小波，同时满足归一化条件式 (2)。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\|\varphi\|^2 = \langle \Psi, \Psi \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) \Psi^*(t) dt = 1 \dots\dots (2)$$

由容许小波 $\Psi(t)$ 生成的函数系 $\Psi_{a,b}(t)$ 也是小波：

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0$$

式中： a 为尺度伸缩系数， b 为时间平移系数。

设函数 $f(t)$ 为平方可积分函数 [$f(t) \in L^2(R)$]，其连续小波变换定义为：

$$Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, a \neq 0$$

使用小波变换进行信号处理时，常采用离散化处理。尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化公式分别取作 $a = a_0^j$ 和 $b = ka_0^j b_0$ ，对应的离散小波 $\Psi_{j,k}(t)$ 写作：

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - kb_0)$$

离散化小波变换表示为：

$$D_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt \quad j, k \in Z$$

通常离散化参数取作 $a_0 = 2, b_0 = 1$ ，此时的离散化小波为：

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j} t - k) \quad j, k \in Z$$

该离散化小波相应的尺度函数为：

$$\Phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Phi(2^{-j} t - k) \quad j, k \in Z$$

尺度变换为 $C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Phi_{j,k}^*(t) dt \quad j, k \in Z$
 根据 Mallat 塔式重构算法的思想，任何函数 $f \in L^2(R)$ 都可根据分辨率为 2^{-N} 时 f 的粗糙像和分辨率 2^{-j} ($1 \leq j \leq N$) 下的细节完全重构。粗糙像系数 (scaling coefficient) $C_{j,k}$ 和细节系数 (wavelet coefficient) $D_{j,k}$ 由下列式子得到：

$$C_{j+1,m} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h^*(k-2m) C_{j,k} D_{j+1,m}$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} g^*(k-2m) C_{j,k}$$

$$C_{j,k} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(k-2m) C_{j+1,m} + \sum_{m=-\infty}^{\infty} g(k-2m) D_{j+1,m}$$

通过上述的算法，在时域内可将 $f(t)$ 分解不同的频段。本研究中采用 4 阶 Daubechies 滤波器产生的尺度函数 $\Phi(t)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 对声发射信号进行多尺度分析。

2. 特征生成 声发射 (AE) 信号是金属材料在受力后发生晶格错位、裂纹扩展与断裂时释放出的一种超高频应力波 (频率一般在 50kHz—1MHz)，信号的能量分布在高频段。通过小波分析，得到下列各个频段的小波系数和最后一级的尺度系数：0~62.5, 62.5~125, 125~250, 250~500kHz, 0.51~1MHz。各个频段的小波系数和最后一级的尺度系数的均方根值组成特征向量，作为模糊控制系统的输入。

- N_{i1} = 频段 [0~62.5] kHz 尺度系数 ca_4 的均方根 (RMS) 值
 - N_{i2} = 频段 [62.5~125] kHz 小波系数 cd_4 的均方根 (RMS) 值
 - N_{i3} = 频段 [125~250] kHz 小波系数 cd_3 的均方根 (RMS) 值
 - N_{i4} = 频段 [250~500] kHz 小波系数 cd_2 的均方根 (RMS) 值
 - N_{i5} = 频段 [500~1000] kHz 小波系数 cd_1 的均方根 (RMS) 值
- 下标 i 为样本的标号。为消除信号的幅值影响：

$$N_{ij} = 2^i (N_{ij} - N_{jmin}) / (N_{jmax} - N_{jmin}) - 1$$

式中： N_{jmin} 和 N_{jmax} 分别为所有样本中上述 5 个分量的最小值与最大值 ($j = 1, 2, 3, 4, 5$)。

二、模糊控制系统的设计

本研究采用模糊控制器对得到的特征进行处理。模糊控制器主要由模糊化接口、知识库、模糊推理机、解模糊接口组成^[4]。

1. 模糊规则的确定 模糊控制器的输入为由小波变换而得到的 N 维特征向量 (共设 M 个样本)，输出为单输出 (刀具磨损值)，即 M 个 $N+1$ 维样本。首先通过建立模糊 Fuzzy 相似关系矩阵，对样本进行分类^[5] (类别的数目等于模糊子集数)。由此确定规则数 nr 。各个输入量的隶属度函数采用高斯函数，输出量采用输入量线性组合的方法确定，即对于规则 i 有：

IF x_1 is lx_1, x_2 is lx_2, x_3 is lx_3, x_4 is lx_4

THEN $u^i = c_{i0} + c_{i1}x_1 + c_{i2}x_2 + c_{i3}x_3 + c_{i4}x_4$

然后利用最小二乘法确定每条规则的线形组合系数 c_{ij} 和每条规则的权重 w^i [6][7], 其中 $i = 1, 2 \dots 10, j = 1, 2 \dots 5$ 。

2. 解模糊 在本研究中, 采用加权平均法(WMM)来实现解模糊, 以得到具体的输出值(刀具磨损值):

$$u = (\sum_{i=1}^n w^i u^i) / \sum_{i=1}^n w^i$$

上述的模糊推理系统称为 Sugeno 模糊控制系统。

三、实验设备与结果

1. 实验设备 本实验为铣刀的磨损监控。信号的采集、处理过程如图 1 所示:

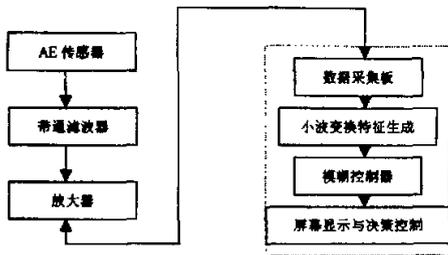


图 1 监控系统结构

为保证模糊控制在整个加工过程中的可靠性, 样本的获取必须同时满足: 在铣刀的不同磨损阶段获取; 在不同的加工条件下获取。在实验中采用以下两种加工条件: a) 直径为 $\phi 3$ 的高速钢铣刀, 主轴转速为 1120r/min, 进给速度分别为 15.68mm/min, 切深为 5mm, 工件采用球墨铸铁(HRC24); b) 直径为 $\phi 4$ 的高速钢铣刀, 主轴转速为 900r/min, 进给速度为 12.6mm/min; 切深为 3mm, 工件材料 45 调质钢(HRC22)。刀具磨损的测量工具为 JGX-1 小型工具显微镜, 其精度为 0.01mm。

2. 实验结果分析 在本研究中, 利用采集到的 72 组数据(两种切削条件下各采 36 组)的 1 个尺度系数和 4 个小波系数为特征值作为训练样本, 按照前面所述的模糊控制系统的设计方法, 得到 Sugeno 模糊控制系统; 然后以另外 20 组数据(在第 2 种切削条件下获得)作为测试样本。

图 2 是用于测试的 20 组数据的磨损曲线(测试样本的时间间隔为 20s)。图中带 \circ 曲线是实际测量的刀具磨损值, 带 \bullet 曲线是经过 Sugeno 模糊控制系统得到的值。所得值的最大相对误差 10% (允许误差范围)。

Sugeno 模糊控制系统的响应时间约为 25ms。进一步实验证明, 该方法检测刀具磨损相对误差小于 10% 的成功率为 96%, 这主要是因为工件的硬度不均匀, 硬度的变化会明显地改变信号各个特征的大小(此时的数据称为异常数据), 而系统会错误地认为这是刀具磨损增大所致, 因此导致误判。异常数据的判别和剔除本研究采用科学的统计法(格拉布斯检验法)来判别和剔除[8]。

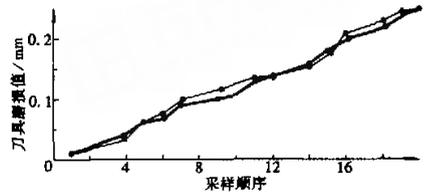


图 2 模糊控制系统测试曲线

图 3 是 Sugeno 模糊控制系统输出与刀具的实际磨损值线形回归图。该图中 A 是刀具的实际磨损值; T 是 Sugeno 模糊控制系统的输出。

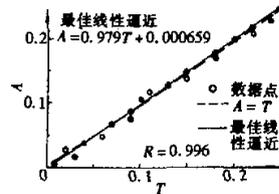


图 3 模糊控制系统输出与刀具的实际磨损值线形回归图

四、结论

本文以信号的尺度系数和小波系数的均方根值作为特征值时, 系统对切削条件的变化不敏感, 这可以满足变切削条件的要求。实际证明, 该模糊控制系统能够满足使用的要求。

在实时性方面, 在主频为 166MHz 的微机, 从带通滤波、小波特征的提取到模糊控制系统的状态识别, 所用时间约为 600ms, 而在实际应用中, 每次采集数据的时间间隔可以设为 1s、2s 等, 因此, 本研究能够满足实时性要求。

参考文献

- 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 程正兴. 小波分析算法与应用. 西安交通大学出版社, 1998

碟形弹簧专用检具

□肖峰

碟形弹簧是双作用离合器拖拉机的关键零件之一。它的好坏直接影响着拖拉机离合器的工作性能,例如,碟形弹簧破裂,压紧力量不足及塑性变形等现象时有发生。

碟形弹簧形状复杂,技术要求高,由于没有专用检具,检测时常常使检验人员感到十分为难。为解决此问题,确保拖拉机离合器的装配质量,设计了一套碟形弹簧专用检具。该检具由两套分检具组成。一套是检验碟簧的载荷性能;另一套则检验碟簧静载荷时的塑性变形状况。

碟形弹簧载荷检具是由加力螺杆、压盘、下底座、百分表、龙门架、压力传感器及传感器上、下联结头等组成(见图 1a);静载荷塑性变形检具是由螺杆、螺母、压头和下底座等组成(见图 1b)。

载荷性能检验:碟形弹簧安放在图 1a 检具的下底座上,装好压头,再将压力传感器上、下联结头总成装正,放稳。轻轻扳动加力杆,推动加力螺杆慢慢下行,与钢球刚刚接触后停住,仔细调整和校正百分表的位置和表针“0”位,然后继续扳动加力杆,使螺杆均匀地下压,直至百分表表针指到碟簧技术要求所规定的变形量值(下压变形量为 3.0mm)为止,同时检查压力传感器显示的读数,是否达到了技术要求规定值(规定值为 $3850 \pm 250\text{N}$)。如达到了技术要求,再如此重复检验数次,若无变化,就检查变形规律是否符合曲线要求。按下压变形量从 1.0mm、1.5mm ~ 4.0mm、4.5mm 进行检测时,碟簧变形规律均应符合曲线要求。

静载塑性变形检验:载荷检验合格的碟形弹簧,放在图 1b 检具下底座上,装上压头,用扳手拧动螺母,使螺母刚接触到压头平面后,把辅助测量百分表测头放在压头台阶平面上,对好表针“0”位,再慢慢地拧动螺母,使碟簧下压变形量到规定值(变形量为 6.0mm)后,

静置 24h 后松开,碟簧锥面高度应恢复到检前高度,且没有塑性变形的现象,则判定此批次为合格品。

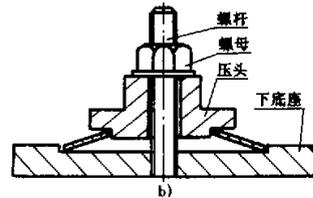
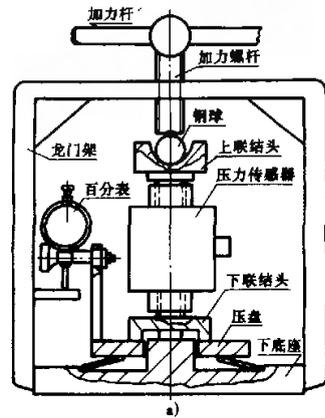


图 1 碟形弹簧专用检具

碟形弹簧检具投入使用后,效果十分明显,基本解决了碟簧难于检验的情况。经专用检具检验的碟簧,使双作用离合器拖拉机的故障率大幅度下降,对保证拖拉机的装配质量起到了良好的作用。

作者通讯地址:湖北拖拉机厂(黄石 435015)

收稿日期:20000510

3 温熙森等.模式识别与状态监控.北京:国防科技大学出版社,1997
 4 张乃尧.神经网络与模糊控制.北京:清华大学出版社,1996
 5 李友善.模糊控制理论及其在过程控制中的应用.北京:国防工业出版社,1993
 6 Abraham Kandel et al. Fuzzy Control System. CRC Press. 1993

7 S. Chiu. Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation. Journal of Intelligent & Fuzzy System. 1994, 2(3)
 8 袁哲俊.金属切削实验技术.哈尔滨工业大学,1987

作者通讯地址:北京理工大学 7 系 98 博(100081)

收稿日期:20000905

基于小波分析和模糊控制理论的铣刀磨损监控方法

作者: [马建峰](#), [王信义](#)
作者单位: [北京理工大学7系98博](#)
刊名: [现代制造工程](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [MODERN MANUFACTURING ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2001, ""(10)
引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. [张贤达](#), [保铮](#) [非平稳信号分析与处理](#) 1998
2. [程正兴](#) [小波分析算法与应用](#) 1998
3. [温熙森](#) [模式识别与状态监控](#) 1997
4. [张乃尧](#) [神经网络与模糊控制](#) 1996
5. [李友善](#) [模糊控制理论及其在过程控制中的应用](#) 1993
6. [Abraham Kandel](#) [Fuzzy Control System](#) 1993
7. [S Chiu](#) [Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation](#) 1994(02)
8. [袁哲俊](#) [金属切削实验技术](#) 1987

相似文献(3条)

1. 期刊论文 [马建峰](#), [王信义](#), [郑军](#), [唐伏良](#) [模糊控制理论在铣刀磨损监控中的应用](#) -[北京理工大学学报](#)2001, 21(3)
研究一种铣刀磨损监控方法. 信号采集采用声发射传感器, 信号特征生成采用小波变换方法, 将变换后的尺度系数和各个频段的小波系数作为特征; 采用自行设计的Sugeno模糊控制系统进行状态识别, 模糊控制系统的输出是刀具磨损值, 有利于对刀具磨损进行各种实时补偿. 实验表明, 模糊控制作为刀具磨损状态识别的方法, 取得了良好的效果.
2. 期刊论文 [李勇](#), [王细洋](#), [王学超](#), [LI Yong](#), [WANG Xi-yang](#), [WANG Xue-chao](#) [基于AR模型的铣刀磨损诊断 - 失效分析与预防](#)2009, 4(1)
传统的铣刀磨损故障诊断大多采用小波分析结合神经网络的方法, 该方法的缺点是算法复杂, 计算量大, 很难实现铣刀磨损的在线识别并对其进行反馈控制. 本文引入自回归(AR)模型来表征刀具切削过程的正常工作状态, 用Levinson-Durbin递归算法求解Yule-Waker方程获得AR模型的系数. 将建立的AR模型作为线性滤波器处理其它各种状态铣刀振动信号, 获得预测误差信号, 之后对预测误差信号进行各种统计特征分析. 试验结果表明, 预测误差信号的方差是有效的与刀具磨损相关的指标, 可以用来在线识别加工过程铣刀磨损状态.
3. 学位论文 [金建江](#) [转子轮槽铣削加工刀具状态在线监控研究](#) 2008
汽轮机转子是火力发电机组的关键部件之一, 其转子纵树型轮槽型线复杂, 成型铣削工作量大, 切削加工时极易发生刀具磨损或破损, 需要操作人员注意力高度集中以防止刀具失效造成工件超差及烧伤等质量事故. 研制轮槽加工刀具状态及切削过程在线监控系统, 对保证加工质量, 降低操作人员劳动强度具有重要的经济和实用价值.
本文采用温度、声音及功率三种非接触式传感器用于在线监测切削加工过程及刀具状态. 基于虚拟仪器软件开发工具LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 作为数据采集系统软件设计平台. 软件由数据采集与存储、数据分析、数据标定与超限报警三个主要模块组成, 以实现切削温度、声音及功率参数的实时采集、信号调理和实时显示等功能. 在数据分析模块采用了信号数字滤波技术和FFT以及小波分析. 本文通过等螺旋角波型刀轮槽铣刀磨损试验研究了不同主轴转速、进给功率和径向切削深度对刀具磨损状态的影响, 在试验室及汽轮机车间转子轮槽铣床上, 利用刀具状态监控系统测量铣削过程中各监控参数, 并对监控参数与切削参数及铣刀磨损状态的相关性进行了研究, 获取了刀具在不同磨损状态下的切削温度、切削声音和切削功率信号, 通过对信号的处理分析, 初步实现了刀具磨损的识别.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxgys200110020.aspx

下载时间: 2010年6月2日