

融合量子理论的结构元素尺寸自适应调整策略^{*}

张培林¹, 陈彦龙¹, 李兵², 吴定海¹

(1. 军械工程学院七系 石家庄, 050003) (2. 军械工程学院四系 石家庄, 050003)

摘要 受量子理论启发, 提出一种针对数学形态学结构元素尺寸自适应调整的新策略, 以达到更优的冲击响应信号形态学提取效果。首先, 结合量子理论建立起振动信号的量子系统, 在此基础上提出了振动信号的量子比特数学表达式, 用于刻画振动信号的状态; 然后, 针对机械振动信号的局部特点, 分析 1×3 邻域的振动信号相关性, 提出了机械振动信号在量子概率特征下的结构元素尺寸衡量算子; 最后, 依据尺寸衡量算子和自适应控制结构元素的长度达到更优的滤波效果。利用该策略对轴承冲击故障信号进行形态滤波, 并与传统方法进行了比较, 结果表明该方法可以有效提取信号的全局和局部特征。

关键词 振动分析方法; 冲击响应; 量子力学; 数学形态学; 结构元素; 自适应

中图分类号 TH113.1; TN911.7

引言

机械设备结构复杂, 为实现高效安全生产, 需要对设备的运行状态进行快速有效的评估。当机械设备发生故障时, 运转过程中会产生冲击力, 振动信号中将出现冲击响应成分, 监测信号将发生突变。因此, 准确地提取冲击响应信号, 快速地诊断故障, 能够显著提高设备的监测管理效率。

数学形态学具有良好的信号处理能力, 研究表明^[1-3], 不同的结构元素(structuring element, 简称 SE)长度将对分析产生极大影响。然而, 对于现场采集的故障信号, 由于冲击响应成分的先验知识匮乏, 难以选择合适长度的 SE; 另一方面, 信号在不同的时刻, 局部特征存在差异, 固定 SE 长度的细节处理能力欠缺, 无法实现信号的最优处理^[4]。文献[5]通过动态调整椭圆形结构元素的长度, 实现了图像的边缘连接。文献[6]自适应地调整圆形结构元素的长度, 并应用于木质识别。文献[7]采用多尺度形态学分析, 通过改变结构元素的尺度, 取得了良好的图像分析效果。以上方法均针对图像, 为提高形态学处理一维机械信号的能力, 需要针对一维振动信号的特征, 对结构元素的尺寸实现自适应调整。

量子理论对物理世界的描述方法, 推动着其他领域的快速发展^[8-10], 目前已在快速检索、信号加密

和图像处理等领域取得了大量成果, 显示出量子理论的巨大研究价值。笔者受量子理论启发, 提出融合量子理论的结构元素尺寸自适应调整策略(adaptive adjustment strategy of structuring element length integrating quantum theory, 简称 AASQT), 并应用于冲击响应信号的提取。采用量子理论量化振动信号的局部特征, 用于指导 SE 长度的选择, 最终实现 SE 尺寸的自适应调整, 并利用具有自适应长度的结构元素(adaptive length structuring element, 简称 ALSE)完成对故障冲击响应信号的优化提取。采用实测轴承内圈故障信号进行测试, 并与采用固定长度结构元素(fix length structuring element, 简称 FLSE)的形态学处理结果进行对比, 结果表明, 采用 AASQT 的形态学处理方法能在强背景噪声下有效提取出故障的冲击响应成分, 兼顾了信号的全局和局部特征, 且计算快速, 可应用于机械设备的在线监测。

1 数学形态分析

1.1 形态学梯度算子

数学形态学变换对非线性振动信号具有极强的分析能力, 它根据对象的几何特征, 利用 SE 对信号进行度量或修正, 以达到提取有用信息的目的^[6]。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51205405, 51305454)
收稿日期: 2013-08-28; 修回日期: 2013-10-15

笔者采用形态梯度算子作为形态滤波器^[11]

$$\text{GRAD}(f(n)) = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \quad (1)$$

其中:GRAD 指形态梯度算子; $(f \oplus g)(n)$ 为膨胀运算; $(f \ominus g)(n)$ 为腐蚀运算。

在一维信号分析中,由于形态梯度算子可以检测暂态信息,因此成为凸显冲击响应信息的有力工具,研究发现它能够在准确检测出冲击响应位置的同时,有效保留冲击响应形状。

1.2 结构元素的参数设置

确定形态滤波器的形式后,结构元素成为影响形态学处理效果的关键因素。由于扁平型结构元素(SE 的幅值为 0)避免了对信号幅值的修改且运算量少,因此笔者采用平型结构元素。

扁平结构元素由于幅值为 0,在形态运算中参数设置仅涉及到长度。研究表明^[2,12],采用不同的长度结构元素,对信号的分析效果影响极大。文献[12]以冲击响应次数最多为准则得出 $0.6d \sim 0.7d$ (d 为冲击响应周期内采样点数)为最佳结构元素长度,但当采样频率较大时,SE 长度仍会在一个较大范围内浮动,元素的长度仍然难以确定。由于一个信号中包含较多的成分,使用 FLSE 分析时只能提取出与 SE 相匹配的成分,为实现更好的信号分析效果,需要 SE 的尺寸随着信号的局部特征自适应变化。

结合量子理论,笔者对信号的局部特征进行定量分析,将分析结果作为 SE 尺寸自适应变化的依据,实现 SE 尺寸在 $0.6d \sim 0.7d$ 内自适应变动。

2 振动信号的量子系统

量子比特的状态是 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 两种量子态的线性叠加,其数学形式为

$$|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad (2)$$

其中: a, b 为量子态的概率幅,为满足归一化条件 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 的复数, $|a|^2, |b|^2$ 分别为式(2)中 $|0\rangle, |1\rangle$ 两个基态的出现概率。

式(2)表明,量子比特描述的状态是不确定的,它能够以不同的概率表示各种状态。如果用 $|0\rangle$ 代表振动信号的一种状态,用 $|1\rangle$ 代表振动信号的另一种状态,分析概率幅 a 和 b 就能够得出振动信号的不同状态,有利于刻画信号的局部特征。

若一个振动信号由 k 个量子位描述,其中第 m 个量子位的状态为 $|\varphi_m\rangle = a_m|0\rangle + b_m|1\rangle$,该振动信号的状态可用 k 个单量子比特的直积态表示为

$$\begin{aligned} |\varphi\rangle = & |\varphi_1\rangle \otimes |\varphi_2\rangle \otimes \cdots \otimes |\varphi_k\rangle = \\ & a_1 a_2 \cdots a_k |00\cdots 0\rangle + a_1 a_2 \cdots a_{k-1} b_k |00\cdots 01\rangle + \\ & \cdots + b_1 b_2 \cdots b_k |11\cdots 1\rangle = \sum_{m=0}^{2^k-1} \omega_m |m_b\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $|m_b\rangle$ 表示含 k 个量子比特的量子系统 $|\varphi\rangle$ (振动信号)的基态,为二进制表达形式,其意义为量子系统(振动信号) $|\varphi\rangle$ 的第 m 个基态; ω_m 为相应基态的概率幅。

$|\omega_m|^2$ 表示基态 $|m_b\rangle$ 的出现概率,根据量子表达式的要求,需满足式(4)的条件。

$$\sum_{m=0}^{2^k-1} |\omega_m| = 1 \quad (4)$$

3 结构元素自适应调整策略

3.1 振动信号的量子比特

振动信号的量子系统里最关键的部分是振动信号的量子比特,本部分将给出振动信号量子比特的数学表达式。

假设传感器采集信号为 $s(i) (i=0, 1, \dots, n-1)$,对 $s(i)$ 归一化得到信号 $y(i) \in [0, 1]$ 。引入自适应阈值 $T \in (s_{\min}, s_{\max})$,采用的归一化变换为

$$y(i) = \begin{cases} \frac{s(i) - s_{\min}}{2(T - s_{\min})} & s(i) \leq T \\ 0.5 + \frac{s(i) - T}{2(s_{\max} - T)} & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

机械振动信号虽然包含非平稳、非线性成分以及各类干扰噪声,但在本质上具有统计性^[13-14],从概率统计的角度出发处理信息的启发^[15-16],提出式(6)所示的振动信号量子比特的数学表达式,用以实现振动信号从时域空间到量子空间的映射

$$|y_0(i)\rangle = \sqrt{1 - y(i)} |0\rangle + \sqrt{y(i)} |1\rangle \quad (6)$$

其中: $|0\rangle, |1\rangle$ 为振动信号量子比特中的两个基态,分别对应振动信号中最小值 $s(i)_{\min}$ 和最大值 $s(i)_{\max}$ 两个状态; $\sqrt{1 - y(i)}$ 和 $\sqrt{y(i)}$ 为两个基态的概率幅; $1 - y(i)$ 和 $y(i)$ 分别表示振动信号中最小值 $s(i)_{\min}$ 和最大值 $s(i)_{\max}$ 的出现概率。

由于 $(\sqrt{1 - y(i)})^2 + (\sqrt{y(i)})^2 = 1$,因此概率幅 $\sqrt{1 - y(i)}$ 和 $\sqrt{y(i)}$ 满足归一化条件,符合量子比特的定义。

3.2 尺寸衡量算子

在振动信号量子比特的基础上,结合振动信号

的相关性,提出机械振动信号在量子概率特征下的结构元素尺寸衡量算子(length measurement operator,简称 LMO),用于指导结构元素尺寸的自适应选择。

图 1 为原始信号 $s(i)$ 的 1×3 邻域窗口,该邻域窗口可构成 3 量子位系统,其态矢为 $|s(i-1)s(i)s(i+1)\rangle$ 。利用式(5)得到 $s(i)$ 的归一化数值 $y(i) \in [0, 1]$,结合式(3)可知,对于三量子比特系统,则该 $|s(i-1)s(i)s(i+1)\rangle$ 可表示为

$$\begin{aligned} & |s(i-1)s(i)s(i+1)\rangle \geq \\ & \sqrt{(1-y(i-1))(1-y(i))(1-y(i+1))} |000\rangle + \\ & \sqrt{(1-y(i-1))(1-y(i))y(i+1)} |001\rangle + \\ & \sqrt{(1-y(i-1))y(i)(1-y(i+1))} |010\rangle + \\ & \sqrt{(1-y(i-1))y(i)y(i+1)} |011\rangle + \\ & \sqrt{y(i-1)(1-y(i))(1-y(i+1))} |100\rangle + \\ & \sqrt{y(i-1)(1-y(i))y(i+1)} |101\rangle + \\ & \sqrt{y(i-1)y(i)(1-y(i+1))} |110\rangle + \\ & \sqrt{y(i+1)y(i)y(i+1)} |111\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

$s(i-1)$	$s(i)$	$s(i+1)$
----------	--------	----------

图 1 1×3 邻域位置关系

Fig. 1 1×3 neighborhood

机械设备的振动具有较强的关联性,相邻时刻的振动大小关联紧密,而噪声不具备此特点,基于此在 1×3 窗口中提出尺寸衡量算子。从三量子位系统基态概率统计的角度出发,LMO 在 1×3 窗口中沿水平方向进行处理,运用 LMO 输出的数值作为对应位置的 SE 长度的衡量指标。

LMO 用于选择最佳的结构元素尺寸,提取故障的冲击响应信号,在数值处理上需要符合冲击响应信号的特征。因此,一方面 LMO 统计峰值信息,对应振动基态为 $|010\rangle$;另一方面,保留振动信号的波谷信息,对应振动基态为 $|101\rangle$ 。结合式(3),波峰波谷信息对应的十进制为 2,5。所以,LMO 取 $m = 2, 5$ 时两种基态的概率总和。LMO 的表达式为

$$\text{siz}(i) = \sum \{ |w_m|^2, m = 2, 5 \} \quad (8)$$

其中:siz 指 LMO 定量衡量的结果,siz 可进一步表示为

$$\begin{aligned} \text{siz}(i) = & (1-y(i-1))y(i)(1-y(i+1)) + \\ & y(i-1)(1-y(i))y(i+1) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)给出了 LMO 的计算方法。从算子的计算过程来看,水平方向上,从左到右和从右到左,该算子都能得到相同的结果,表明了该算子具备较强

的适应能力。

对于长度为 n 的振动信号,LMO 的时间复杂度为 $O(n)$,该方法能够快速地完成计算。

3.3 结构元素的长度

机械振动信号在量子概率特征下的 SE 尺寸衡量算子 siz 描述了振动信号中冲击响应信号局部特征,以此为依据可以有效地进行 SE 的尺寸选择。根据文献[12]的曲线图,确定结构元素的自适应尺寸为

$$\text{len}(i) = \begin{cases} \lceil \text{len}(i) \rceil & \text{len}(i) \leq 0.6d \\ \lfloor \text{len}(i) \rfloor & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中: len 指根据文献[12]拟合的结构元素长度变化曲线,即

$$\text{len}(i) = 0.7d - 0.1d\text{siz}(i) \quad (11)$$

式(10,11)能够保证结构元素的尺寸在 $0.6d \sim 0.7d$ 范围内变动,实现 SE 长度的自适应调整,依据此方法获得的结构元素称为自适应长度结构元素(ALSE)。

3.4 阈值处理

在 1×3 振动信号窗口中,LMO 能够有效描述振动信号的冲击响应细节特征。在量子概率 LMO 中,通过参数 T 可有效调节振动信号的细节部分,为了保证机械振动信号处理效果,需对阈值参数 T 的设定进行处理,笔者以形态滤波后的振动信号信息熵最大化为原则,自适应确定阈值参数 T 。兼顾计算成本和算法效果,在确定 T 的过程中, T 的迭代步长为 0.01。

根据信息论,经 ALSE 形态滤波后所得振动信号 $s_{\text{siz}}(i)$ 的信息熵公式为

$$H(s_{\text{siz}}) = - \sum p(x) \lg p(x) \quad (12)$$

其中: $p(x)$ 表示经 ALSE 形态滤波后的振动信号 $s_{\text{siz}}(i)$ 中,振动大小为 x 的出现概率。

3.5 采用 AASQT 的形态滤波器

采用 AASQT 的形态滤波器步骤描述如下:

- 1) 读入机械振动信号 $s(i)$;
- 2) 初始化参数 $T = s_{\min} + 0.01$, 变量 $\text{opt_h} = 0$, $\text{opt_T} = 0$, opt_h 和 opt_T 分别用于存放当前最大信息熵及其对应的阈值 T ;
- 3) 将阈值参数 T 代入式(5)归一化振动信号得到 $y(i)$;
- 4) 在当前 T 取值情况下,根据式(9)获得 LMO 的输出值;

5) 根据 LMO 的输出,利用式(10,11)获得各个采样点的扁平 SE 自适应尺寸;

6) 根据式(1),利用各个采样点对应长度的 SE 进行滤波,得到振动信号 $s_{siz}(i)$;

7) 根据式(12)计算 $s_{siz}(i)$ 信息熵 H ;

8) 若信息熵 $H > opt_h$,则更新 opt_h, opt_T ; 否则 opt_h, opt_T 保持不变;

9) 执行 $T = T + 0.01$,如果 $T < s_{max} - 0.01$ 重复步骤 3)~8), 否则进行下一步;

10) 令 $T = opt_T$,重复步骤 3)~6), 得到最终的输出信号 $s_{siz}(i)$ 。

4 实验结果与分析

采用某机械装备的综合传动装置进行研究。在轴承内圈上加工出 $3\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ (长 \times 深)的划痕用于模拟冲击故障,使振动信号中包含冲击响应成分。采集加速度振动信号,实测转动速度为 $1\ 830\text{ r/min}$ (30.5 Hz),在 3 档档位上测量,传感器安装在对应轴承位置的箱盖上方。内圈故障理论频率应为 158 Hz 。

采样频率为 12 kHz ,采样时间为 0.6 s ,故障信号波形如图 2 所示。频谱中可以看出,故障频率淹没在噪声频率中。

采用固定长度结构元素进行形态梯度算子滤波,SE 为扁平型,根据文献[12]设定 SE 长度为 46,处理结果图 3 所示。采用 FLSE 能够在强背景噪声下提取出一部分冲击响应信息,从图 3(b)能够看出,FLSE 提取出的信号存在较多无关频率,特征频率 158 Hz 周围存在较强的干扰, 158 Hz 及其二倍频 316 Hz 的边带也难以观察,不利于故障的诊断。

采用笔者提出的方法 AASQT 进行滤波处理,图 4 为获得的波形和频谱,有效地提取出故障冲击响应信号。故障特征频率 158 Hz 、二倍频 316 Hz 明显,且 158 Hz 和 316 Hz 存在明显的边带,间隔 30.5 Hz 与转频的大小一致;同时,转频 30.5 Hz 及其二倍频 61 Hz 明显。以上特征与轴承内圈故障的特点吻合,可以判定轴承的内圈发生故障。

图 5 为采用 AASQT 进行形态学处理时,不同采样点位置的 SE 长度,为便于观察,只显示前 200 个采样点对应的 SE 长度,可以看出在不同的采样点位置,SE 长度不同,SE 长度能够根据信号的局部特征自适应调整。表 1 为信号处理过程中 SE 的长度统计, 0.6 s 中共计包含 $7\ 200$ 个采样点。由于故障频率为 158 Hz ,采样频率为 12 kHz ,因此冲击响

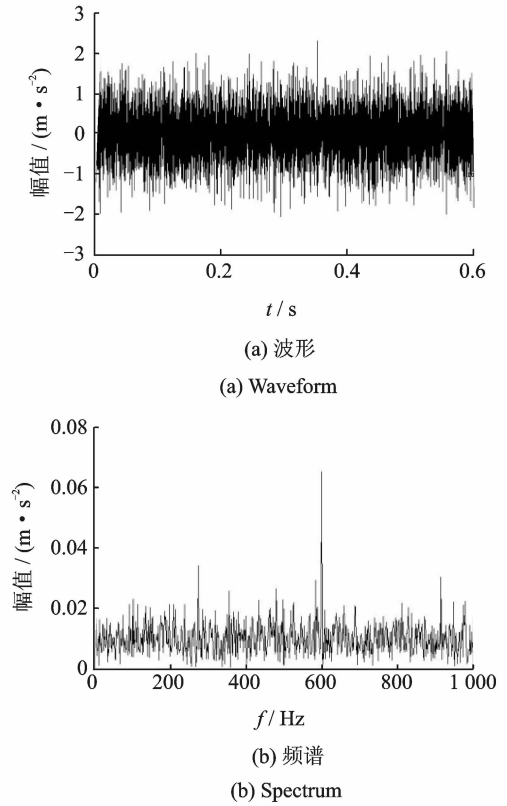


图 2 含强噪声故障信号
Fig. 2 Fault signal with strong noise

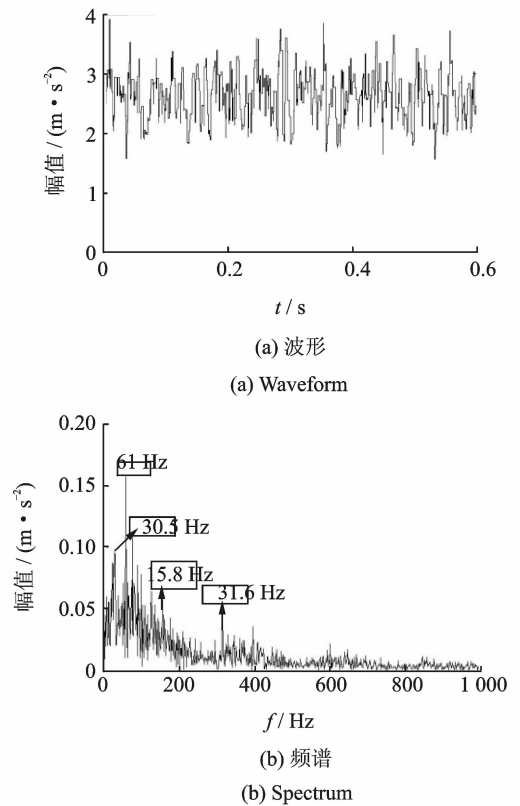


图 3 固定长度结构元素处理结果
Fig. 3 Result of FLSE

表1 结构元素长度统计

Tab. 1 Statistics of SE length

长度	数量	长度	数量
46	1 300	50	632
47	2 455	51	376
48	1 433	52	292
49	687	53	25

$$C_f = \sum_{i=1}^N FC_i / \sum_{j=1}^M F_j \quad (13)$$

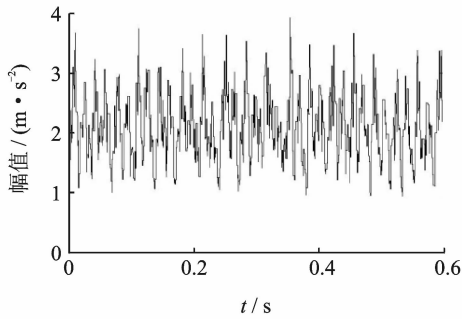
其中： F_j 代表频谱中的各频率的大小； FC_i 为特征频率的大小，这里取 $N=2$ ； C_f 表示特征频率在整个频谱图中所占的能量， C_f 越大，表明特征频率越容易观察。

表2 比较了采用 FLSE 和 ALSE 获得的 C_f ，采用 AASQT 效果最佳。

表2 特征频率强度系数比较

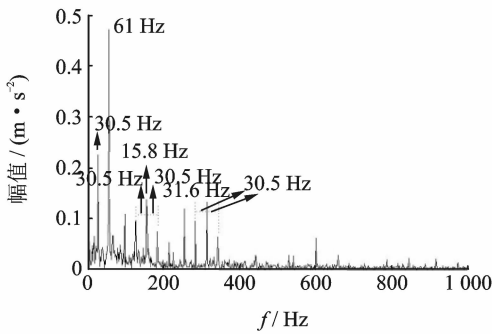
Tab. 2 Comparison of C_f

长度	C_f	长度	C_f
46	0.007 9	50	0.005 3
47	0.009 2	51	0.004 2
48	0.008 3	52	0.003 9
49	0.005 7	AASQT	0.018 6



(a) 波形

(a) Waveform



(b) 频谱

(b) Spectrum

图4 自适应调整策略处理结果

Fig. 4 Result of AASQT

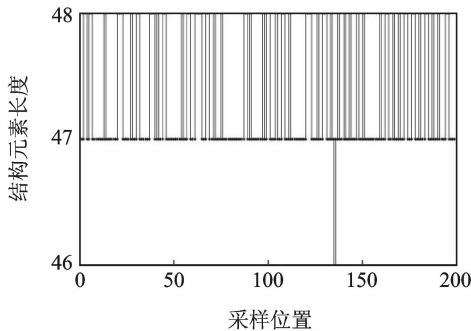


图5 结构元素长度变化

Fig. 5 Length change in SE

应周期内采样点数为 76, 0.6d~0.7d 对应 SE 长度范围为 46~53。由表 1 可见, SE 长度主要分布在 46~48, 最大长度为 53, 最小长度为 46。笔者所提方法 AASQT 根据信号的局部特征, 能够更恰当的分配 SE 长度, 最终将获得更好的全局效果, 因此本研究方法从本质上说兼顾了信号的局部和全局特征。

为更加客观地评价采用 AASQT 进行形态滤波的冲击响应信号提取能力, 运用特征频率强度系数对处理后的信号进行定量评价, 特征频率强度系数 C_f 定义^[2]为

5 结束语

结合量子理论, 笔者提出一种全新的结构元素尺寸自适应调整方法, 并用于冲击响应信号的提取。主要工作包括: 构建振动信号的量子系统; 建立振动信号的量子比特表达式; 采用量子统计概率量化振动信号的局部特征, 并以此为依据对结构元素的长度进行了优化选择, 实现了形态学结构元素的长度自适应调整。实验研究表明, 所提方法综合考虑了振动信号的全局和局部特征, 采用该策略的形态滤波器对机械故障冲击信号具有较好的提取能力且计算速度快, 为强背景噪声下的机械故障信息提取提供了一条新途径。

参 考 文 献

- [1] Zafeiriou S, Petrou M. 2.5D Elastic graph matching [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2011, 115(7): 1062-1072.
- [2] Li Bing, Zhang Peilin, Wang Zhengjun, et al. A weighted multi-scale morphological gradient filter for rolling element bearing fault detection[J]. ISA Transactions, 2011, 50(4): 599-608.

- [3] Li Qiyue, Xu Jie, Wang Weihua, et al. Slope displacement prediction based on morphological filtering[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6): 1724-1730.
- [4] Hao Rujiang, Peng Zhiyong, Feng Zhipeng, et al. Application of support vector machine based on pattern spectrum entropy in fault diagnostics of rolling element bearings[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(10): 1-13.
- [5] Frank Y, Cheng S X. Adaptive mathematical morphology for edge linking[J]. Information Sciences, 2004, 167(1): 9-12.
- [6] Shen P, Mineichi K. Segmentation of pores in wood microscopic images based on mathematical morphology with a variable structuring element[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 250-260.
- [7] Bai Xiangzhi, Zhou Fusheng, Xue Bindang. Infrared image enhancement through contrast enhancement by using multiscale new top-hat transform[J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54(7): 61-69.
- [8] Lu T C, Yu G R. An adaptive population multiobjective quantum inspired evolutionary algorithm for multiobjective 0/1 knapsack problems[J]. Information Sciences, 2013, 243(9): 39-56.
- [9] Niu Qun, Zhou Taijin, Fei Minrui, et al. An efficient quantum immune algorithm to minimize mean flow time for hybrid flow shop problems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2012, 84(10): 1-25.
- [10] Li Yangyang, Shi Hongzhu, Jiao Licheng, et al. Quantum evolutionary clustering algorithm based on watershed applied to SAR images segmentation[J]. Neurocomputing, 2012, 87(6): 90-98.
- [11] 李兵, 张培林, 刘东升, 等. 基于形态梯度解调算子的齿轮故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(1): 39-42.
- Li Bing, Zhang Peilin, Liu Dongsheng, et al. Feature extraction for gear fault diagnosis using morphological gradient demodulation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(1): 39-42. (in Chinese)
- [12] Nikolaou N G, Antoniadis I A. Application of morphological operators as envelope extractors for impulsive-type periodic signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(6): 1147-1162.
- [13] Dwivedi U D, Singh S N. Enhanced detection of power-quality events using intra and interscale dependencies of wavelet coefficients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 358-366.
- [14] 林勇, 胡夏夏, 朱根兴, 等. 基于振动谱图像识别的智能故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 175-180.
- Lin Yong, Hu Xiaxia, Zhu Genxing, et al. Intelligent fault diagnosis using image recognition of vibration spectrogram[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 175-180. (in Chinese)
- [15] Fu Xiaowei, Ding Mingyue, Cai Chao. Despeckling of medical ultrasound images based on quantum-inspired adaptive threshold[J]. Electronics Letters, 2010, 46(13): 52-53.
- [16] 谢可夫, 罗安. 量子启发数学形态学的研究[J]. 电子学报, 2006, 33(2): 284-287.
- Xie Kefu, Luo An. Research on quantum-inspired mathematical morphology[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 33(2): 284-287. (in Chinese)



第一作者简介:张培林,男,1955年12月生,教授、博士生导师。主要研究方向为地面运载平台维修理论与技术。曾发表《自适应 Laplace 统计模型下的量子降噪算法》(《振动、测试与诊断》2014年第34卷第5期)等论文。

E-mail:chenyanlong110@163.com