

# 广义形态滤波器在振动信号处理中的应用研究

张文斌, 周晓军\*, 林 勇

(浙江大学机械与能源工程学院, 杭州 310027)

**摘 要:** 为了更好地滤除振动信号中包含的各种噪声干扰, 在研究数学形态学基本变换的基础上, 提出了一种采用广义形态滤波器来处理旋转机械振动信号的方法。采用广义形态滤波器对振动信号进行降噪处理, 无需考虑振动信号的频谱特征, 通过开一闭、闭一开组合的广义形态滤波器对振动信号滤波处理后即可消除噪声干扰。仿真试验表明广义形态滤波器能更好地剔除脉冲和降低随机噪声干扰, 提高信噪比。广义形态滤波器具有良好的滤波效果, 而且算法简单, 运算速度快, 具有较好的适用价值。

**关键词:** 数学形态学; 广义形态滤波器; 振动信号; 旋转机械

**中图分类号:** TN911.72

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-6819(2008)-6-0203-03

张文斌, 周晓军, 林 勇. 广义形态滤波器在振动信号处理中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 203-205.

Zhang Wenbin, Zhou Xiaojun, Lin Yong. Application research of generalized morphological filter in vibration signal processing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 203-205.(in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

信号处理技术是旋转机械状态监测与故障诊断的核心, 特别是现代数字信号处理技术的出现和发展, 使旋转机械故障诊断技术步入了新的阶段<sup>[1]</sup>。在实际工程测量中, 现场采集到的振动数据往往被各种噪声污染, 数据稳定性差, 严重影响了诊断的准确性, 在某些情况下噪声干扰甚至大于实际的真实信号, 信号降噪成为动态信号测试和设备故障诊断研究的重要内容<sup>[2]</sup>。

数学形态学 (mathematical morphology) 是基于积分几何和随机集论建立起来的数学方法<sup>[3]</sup>。基于数学形态学理论的形态滤波器作为一种非线性滤波器在数字信号处理领域获得了广泛应用。形态滤波器基于信号的几何特征, 利用预先定义的结构元素来局部修正信号的几何结构, 以达到提取信号、抑制噪声的目的。近年来形态滤波器已经成功应用于图像处理、形状分析、计算机视觉及电力系统信号分析方面<sup>[4,5]</sup>, 胡爱军等人也开始在旋转机械轴心轨迹提纯方面开展了一定研究<sup>[6]</sup>。

目前普遍采用的形态开一闭和形态闭一开滤波器, 虽然可同时抑制信号中的正、负脉冲噪声, 但由于其在形态级联过程中使用了相同尺寸的结构元素, 由于形态开的反扩展性和形态闭的扩展性, 导致滤波器的输出存在统计偏移现象<sup>[7]</sup>, 不利于脉冲噪声的抑制。本文根据旋转机械振动信号的特点, 提出采用不同结构元素的广义形态开一闭和闭一开滤波器, 通过处理含噪声的振动信号, 比较了广义开一闭和闭一开滤波器与传统开一闭和闭一开滤波器的性能, 仿真计算表明广义形态滤波器在噪声抑制方面具有较好效果。

## 1 基本形态变换

数学形态学是 1964 年由法国 Matheron G 和 Serra J 在积分几何研究成果的基础上创立的, 是在严格的数学理论基础上建立起来的密切联系实际的科学<sup>[3]</sup>。数学形态学用集合来描述目标, 集合各部分之间的关系说明了目标的结构特点。在考察目标时, 要设计一种被称为结构元素的“探针”, 通过探针不停地

在信号中移动, 便可以考察信号各部分之间的关系, 从而提取有用的信息做结构分析和描述<sup>[1]</sup>。

形态变换一般分为二值形态变换和多值 (灰度) 形态变换。由于在振动信号中一般只涉及一维信号, 本文只限于一维离散情况下的多值形态变换, 包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭, 以及形态开、闭的级联组合。

定义 1 设  $f(n)$  为定义在  $F=\{0, 1, \dots, N-1\}$  上的离散函数,  $g(n)$  为定义在  $G=\{0, 1, \dots, M-1\}$  上的离散函数, 且  $N \geq M$ , 这里  $f(n)$  为输入系列,  $g(n)$  为结构元素, 则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的腐蚀和膨胀分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m=0,1,L,M-1} \{f(n+m) - g(m)\} \quad (n=0, 1, \dots, N+M-2) \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m=0,1,L,M-1} \{f(n-m) + g(m)\} \quad (n=0, 1, \dots, N-M) \quad (2)$$

式中  $\ominus$  和  $\oplus$  分别表示腐蚀和膨胀运算。

$f(n)$  关于  $g(n)$  的形态开和形态闭分别定义为:

$$(f \circ g)(n) = [f \ominus g \oplus g](n) \quad (3)$$

$$(f \bullet g)(n) = [f \oplus g \ominus g](n) \quad (4)$$

式中  $\circ$  和  $\bullet$  分别表示形态开和形态闭运算, 由于噪声通常表现为信号上叠加的“毛刺”, 即一些很尖的“峰”和很低的“谷”, 形态开可以削去“峰”, 形态闭可以填平“谷”, 因此在实际应用中, 对旋转机械振动信号的处理中应采用形态开、闭运算或形态开、闭的级联形式同时去除信号中的正、负脉冲噪声。

## 2 广义形态滤波器的构建

### 2.1 运算方式

Maragos 利用相同的结构元素, 定义了形态开一闭和形态闭一开滤波器<sup>[8,9]</sup>。对于形态开一闭滤波器而言, 首先进行的开运算在去除正脉冲噪声的同时, 增强了负脉冲噪声, 如果再采用相同的结构元素进行闭运算, 就不能有效地去除全部的负脉冲噪声; 同样, 采用相同结构元素的形态闭一开滤波器也不能有效地去除全部的正脉冲噪声。因此, 对上述两种滤波器进行改进, 提出采用不同结构元素的广义形态开一闭和形态闭一开滤波器<sup>[10]</sup>。

定义 2 设  $f(n)$  为定义在  $F=\{0, 1, \dots, N-1\}$  上的离散函数, 两个结构元素分别为  $g_1(n) (n \in G_1)$  和  $g_2(n) (n \in G_2)$ , 且  $G_1 \subset G_2$ , 则广义的形态开一闭和形态闭一开滤波器分别定义为:

收稿日期: 2007-06-09 修订日期: 2008-05-20

作者简介: 张文斌 (1981-), 男, 云南建水人, 博士生, 主要从事车辆检测与信号处理研究。杭州 浙江大学机械与能源工程学院, 310027。

Email: georgezwb@sohu.com

\*通讯作者: 周晓军, 教授, 主要从事车辆工程、脉冲噪声控制与信号处理及无损检测的研究。杭州 浙江大学机械与能源工程学院, 310027。

Email: sky@cmee.zju.edu.cn

$$OC(f(n)) = f(n) \circ G_1 \cdot G_2 \quad (5)$$

$$CO(f(n)) = f(n) \cdot G_1 \circ G_2 \quad (6)$$

利用广义开一闭和闭一开运算的线性组合，不但能消除标准形态算子产生的偏差，而且不模糊信号中的陡峭阶跃变化，较好地保持了信号的几何结构特征<sup>[10]</sup>。本文选用组合形态滤波器的输出为：

$$y(n) = [OC(f(n)) + CO(f(n))] / 2 \quad (7)$$

### 2.2 结构元素的选取

结构元素在形态运算中的作用类似于一般信号处理时的滤波窗口或参考模板，其形状和大小对腐蚀、膨胀运算产生很大的影响<sup>[11]</sup>。待处理信号的形状决定了结构元素的形状设计，其结构要尽可能接近待分析的图形特点。常用的结构元素有直线、曲线、三角形、圆形及其他多边形，相对而言，结构元素越复杂，其滤除信号噪声的能力就越强，但所耗费的时间也越长。结构元素的宽度主要由信号主波的周期和采样频率决定。本文在仿真计算中分别采用直线、三角形和圆形的结构元素来处理含有噪声的振动信号。

### 3 仿真计算

为考察广义形态滤波器对振动信号中噪声的处理能力，设原始振动信号为

$$x(t) = \sin(2\pi \times 50 \times t) + \sin(2\pi \times 100 \times t) \quad (8)$$

取采样频率为 2 kHz，然后在原始信号中加入不同类型的噪声，进行仿真计算如下。

#### 1) 脉冲干扰广义形态滤波分析

在旋转机械振动信号的现场采集中常常混有随机脉冲干扰，为考察广义形态滤波器对脉冲干扰的滤波效果，在原始振动信号中间隔一定的时间加入幅值为 5 的正负脉冲干扰信号  $i(t)$ ，即

$$x(t) = \sin(2\pi \times 50 \times t) + \sin(2\pi \times 100 \times t) + i(t) \quad (9)$$

信号的时域波形及频谱如图 1 所示。从图中可知，由于脉冲具有一定的周期性，频谱图中出现了原始信号中不存在的谐波分量，而且二倍频幅值明显增大，已经不能反映原始振动信号的信息，为此，分别选用长度为 2 和 3 的直线、三角形和圆形结构元素，采用式 (7) 构造的广义开一闭和闭一开组合形态滤波器对信号进行广义形态滤波处理，并采用均方根误差来检

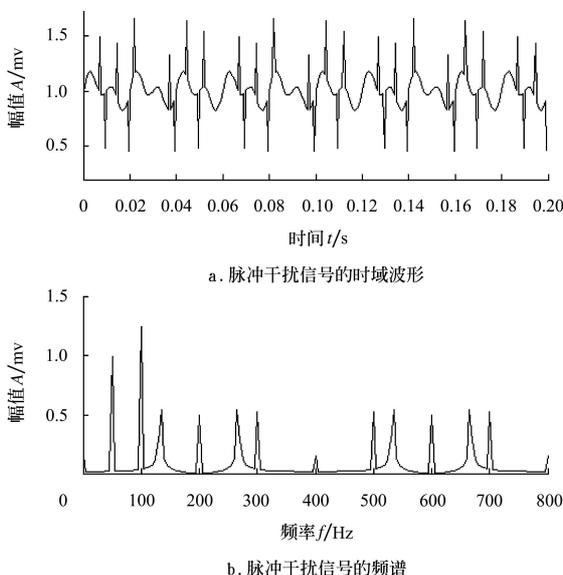


图 1 脉冲干扰信号的时域波形及其频谱  
Fig.1 Waveform and spectrum of pulse interference signal

验滤波效果<sup>[12]</sup>。令输入信号为  $f(n)$ ，输出信号为  $y(n)$ ，则有

$$d = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n) - f(n))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

经过计算可知，直线结构元素处理后的波形其均方根误差最小，信号经过广义形态滤波处理后的时域波形及频谱如图 2 所示，对比图 1、2 可知，滤波后的波形完整地重现了原始振动信号的时域和频域特征，加入的脉冲干扰得到了很好的抑制。

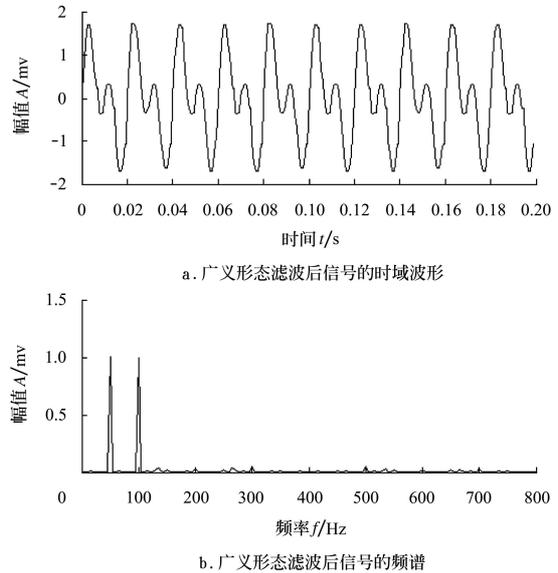


图 2 脉冲干扰信号经过广义形态滤波后的波形及其频谱  
Fig.2 Waveform and spectrum of pulse interference signal after generalized morphology filtering

为了与传统开一闭和闭一开组合形态滤波器进行比较，将该染噪信号进行传统形态滤波处理，选用长度为 3 的直线、三角形和圆形结构元素，仍然采用均方根误差来检验滤波效果，计算所得的结果如表 1 所示。

表 1 不同结构元素下的脉冲干扰信号均方根误差比较  
Table 1 Comparison of RMS error for different structure elements for pulse interference signal

结构元素	直线	三角形	圆形
传统形态滤波器	0.1557	0.2745	0.2379
广义形态滤波器	0.1149	0.1749	0.1701

从表 1 中可以看出，广义形态滤波器能更好地剔除脉冲干扰，使染噪信号在滤波后更加接近于原始振动信号，以便于对振动信号进行下一步的分析和处理。

#### 2) 随机噪声广义形态滤波分析

在原始振动信号中加入均值为 0，标准差为 0.2 的正态分布的白噪声，并分别选用长度为 2 和 3 的直线、三角形和圆形结构元素，采用式 (7) 构造的广义开一闭和闭一开组合形态滤波器对信号进行广义形态滤波处理，广义形态滤波器的滤波效果仍采用式 (10) 所示的均方根误差来检验，结果如表 2 所示。

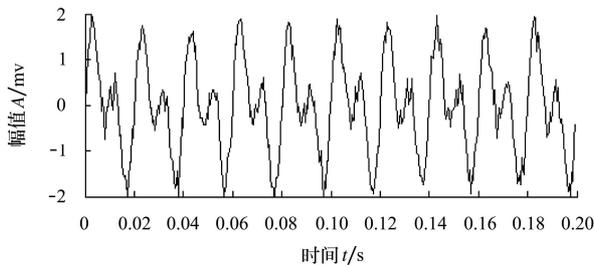
经过计算可知，直线结构元素处理后的效果最好，滤波前后的波形如图 3 所示，从中可以看出滤波后的波形基本保持了原始振动信号的特征。为便于与传统组合形态滤波器比较，我们同样给出了经过 3 种结构元素处理后的波形的均方根误差如表 2 所示。

从表 2 中可以看出，广义形态滤波器比传统形态滤波器有更强的消除噪声能力，这正是由于采用了一小一大不同尺寸的

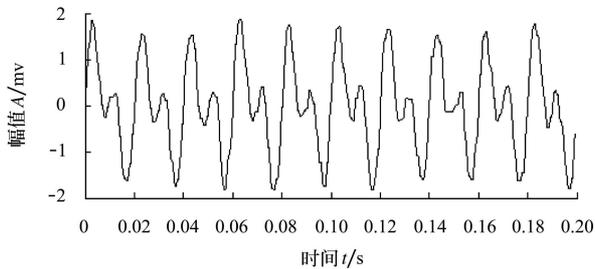
结构元素所得到的效果。

表 2 不同结构元素下的随机染噪信号均方根误差比较  
Table 2 Comparison of RMS error in different structure elements for random interrupted signal

结构元素	直线	三角形	圆形
传统形态滤波器	0.1533	0.1538	0.2157
广义形态滤波器	0.1498	0.1513	0.1701



a. 随机染噪信号滤波前的时域波形



b. 随机染噪信号滤波后的时域波形

图 3 标准差为 0.2 的白噪声在广义形态滤波前后的波形

Fig.3 Waveform of white noise with standard deviation of 0.2 before and after generalized morphology filtering

## 4 结 论

针对振动信号噪声的特点, 在传统开一闭和闭一开形态滤

波器的基础上, 提出了采用不同结构元素的广义形态滤波器处理振动信号的方法。研究了广义组合形态滤波器对不同类型、不同强度噪声下的降噪能力, 仿真计算表明广义形态滤波器能更好地对振动信号进行滤波处理, 并能保持信号的全局和局部特征。该方法滤波效果好, 计算简单, 易于实现, 具有广阔的应用前景。

### [参 考 文 献]

- [1] 唐贵基, 王维珍, 胡爱军, 等. 数学形态学在旋转机械振动信号处理中的应用[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(4): 271-272.
- [2] 胡爱军, 唐贵基, 安连锁. 基于数学形态学的旋转机械振动信号降噪方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 127-130.
- [3] 崔 屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 郭景峰, 申光宪, 郑绳植, 等. 数学形态学在数字滤波中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 144-147.
- [5] 岳 蔚, 刘 沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13-17.
- [6] 安连锁, 胡爱军, 唐贵基, 等. 采用数学形态滤波器的轴心轨迹提纯[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 550-553.
- [7] Stevenson R L, Arce G. Morphological filters: Statistical and further syntactic properties[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1987, 34(11): 1292-1305.
- [8] Maragos P, Schafer R W. Morphological filters—Part I: Their set theoretic analysis and relation to linear shift invariant filters[J]. IEEE Transaction on ASSP, 1987, 35(8): 1153-1169.
- [9] Maragos P, Schafer R W. Morphological filters—Part II: Their relation to median, order-statistic, and stack filters[J]. IEEE Transaction on ASSP, 1987, 35(8): 1170-1184.
- [10] 赵春晖, 孙圣和. 一种形态开、闭自适应加权组合滤波器[J]. 电子学报, 1997, 25(6): 107-111.
- [11] 唐常青, 吕宏伯, 黄 铮, 等. 数学形态学方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [12] Serra J. Morphological filtering: An overview[J]. Signal Processing, 1994, 38(1): 3-11.

# Application research of generalized morphological filter in vibration signal processing

Zhang Wenbin, Zhou Xiaojun\*, Lin Yong

(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to eliminate all kinds of noise interferences in vibration signal, based on the basic transforms of mathematical morphology, a method of using generalized morphological filter to process vibration signals in rotating machinery was put forward. With this method, noise interferences could be eliminated by a combination of open-closing and close-opening generalized morphological filter, without considering vibration spectrum characteristics. Simulation results show that the generalized morphological filter can eliminate pulse interferences and reduce random noises. The generalized morphological filter has good filtering effectiveness, simple algorithm and high calculating speed; it also has good on-site application value.

**Key words:** mathematical morphology; generalized morphological filter; vibration signal; rotating machinery