

文章编号: 2095-2163(2020)05-0213-06

中图分类号: TP29

文献标志码: A

接触式螺纹轮廓曲线多种滤波算法比较分析

倪高峰, 程维明, 曹 振, 王海涛, 赵璐琦

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 在接触式螺纹测量的过程中,采集的表面原始轮廓信号伴随的随机噪声对后续计算螺纹参数值的影响非常大,需要进行滤波处理以便后续参数计算。本文采用模拟的梯形螺纹原始测量数据作为数据源,通过较为常见的四种滤波算法,即低通类滤波器的中值滤波、高斯滤波、平滑滤波以及时域类滤波器的小波滤波,阐述各算法原理及优缺点,以螺纹数据整体的均方根误差、螺纹数据边缘的均方根误差和信噪比作为滤波效果的评价指标,对比四种算法的拟合效果、保真性和细节处理效果,优选出最佳的滤波算法。

关键词: 滤波算法; 螺纹测量; 接触式

Comparative Analysis of Various Filtering Algorithms for Contact Thread Profile Curve

NI Gaofeng, CHENG Weiming, CAO Zhen, WANG Haitao, ZHAO Luqi

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In the process of contact thread measurement, the random noise associated with the original contour signal of the collected surface has a great influence on the subsequent calculation of thread parameters, so filtering processing is needed for subsequent parameter calculation. In this paper, the original measured data of trapezoidal threads are used as data sources. Four common filtering algorithms, namely median filter, Gauss filter, smoothing filter and wavelet filter of time domain filter, are adopted. The principles and advantages and disadvantages of these algorithms are described. The root mean square error and signal-to-noise ratio of the edge of the ridge data are used as the evaluation index of the filtering effect. By comparing the fitting effect, fidelity and detail processing effect of the four algorithms, an optimal filtering algorithm is selected.

[Key words] filtering algorithm; thread measurement; contact type

0 引言

接触式螺纹检测系统采集到的数据点,由于存在测量误差、定位误差、测量环境噪声、以及螺纹表面质量等因素,若直接利用这些数据进行数据拟合和参数计算必然会出现较大的误差,故需要先进行数据的滤波处理,再输入到软件系统中进行参数计算。

中值滤波主要应用在对图像脉冲噪声的滤除,而在一维信号中,对于因测量环境而含有脉冲噪声的螺纹检测信号,中值滤波器亦有很好的平抑效果。此外,中值滤波算法相对比较简单,实现也较为容易^[1]。但同时中值滤波去噪性能受滤波窗口尺寸的影响较大^[2]。高斯滤波在提取表面信息的应用中较为广泛,国际标准 ISO11562 中也规定了高斯滤波器作为一种零相移滤波方法^[3]能有效滤除表面噪声,然而实际使用中该方法与高斯核的选取

以及滤波窗口大小有很大关系。平滑滤波算法采用递推形式计算,可以实时处理非平稳数据,滤掉数据中频繁随机起伏的信号,其计算量较小,计算速度快,可显著提高信噪比^[4],但滤波效果也受滤波窗口大小的影响。基于小波变换的滤波器,因其具有低熵性,多分辨率等特性,可以很好地刻画信号非平稳特性等优点而被越来越多的使用^[5-6],但是小波滤波的结果与小波基、阈值函数以及分解层数有很大关系。

在对螺纹轮廓信号数据滤波时,需要在滤除噪声的同时保护原信号的边缘和形态特征。传统的滤波效果评价指标一般有均方根误差和信噪比,本文采用边缘均方根误差来对滤波的边缘保护效果进行评价。滤波效果与采样点数有着密切的关系,本文所用螺纹点云数据用尽可能少的采样点,来放大各滤波方法在螺纹信号边缘的保护效果。

基金项目: 上海工程技术大学研究生科研创新项目(上海大学探索研究基金资助)。

作者简介: 倪高峰(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:精密检测技术;程维明(1955-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:精密检测技术。

收稿日期: 2019-10-30

1 研究方法及过程

1.1 参数设定

在使用实际测得螺纹点云数据进行滤波处理时,因无法事先知道其真值,所以滤波效果评价比较困难,本次测试采用模拟的一般梯形螺纹一侧牙形进行仿真处理,通过加入相应大小信噪比的高斯白

噪声来模拟实际测得的螺纹点云数据,将已知螺纹真值与滤波后的结果进行比较,可以定量对滤波效果进行评价。如图1所示,模拟的梯形螺纹牙形角为 30° ,引入50 dB高斯白噪声,一个牙形周期采样点为128个。

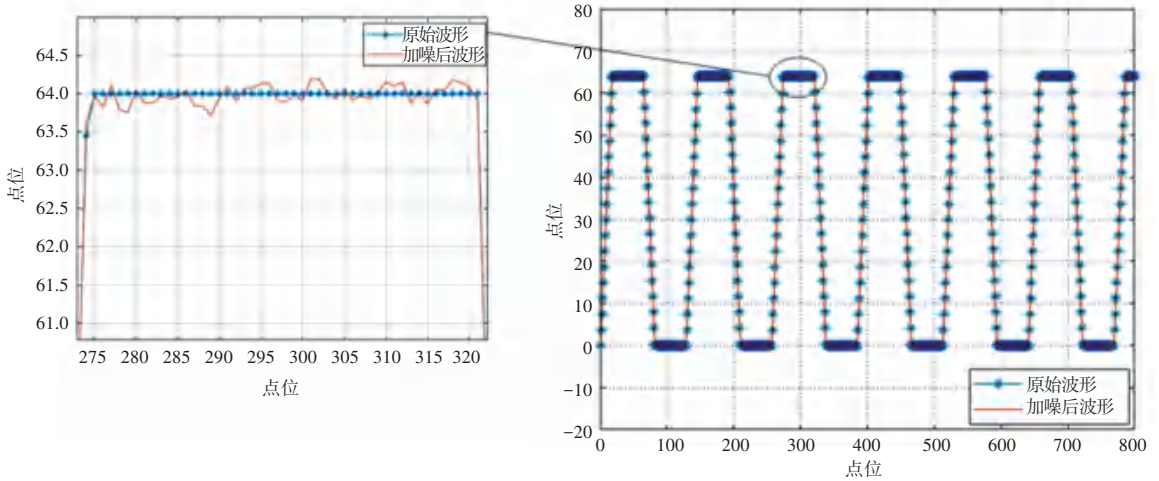


图1 仿真螺纹信号加噪前后对比图

Fig. 1 Contrast Diagram of Simulated Thread Signal before and after Noise Addition

1.2 滤波方法

1.2.1 中值滤波

中值滤波去噪方法是一种非线性平滑去噪技术,它能够有效抑制噪声。其基本原理是利用窗口在数据序列上滑动,对窗口中的数值重新排序,选出中间值并与窗口中的原中间值进行替换^[7]。中值滤波器不会增加新的数据,所以保证了数据分析的准确性^[8]。中值滤波器输出值为公式(1):

$$\text{med}(y_i) = \begin{cases} x_{k+1}, & n = 2k + 1, \\ \frac{1}{2} [x_k + x_{k+1}], & b = 2k. \end{cases} \quad (1)$$

其中, y_i 为输出中间值; x_k 和 x_{k+1} 为原始中间值; $n = 2k + 1$ 和 $n = 2k$ 为窗口大小。

由此可见,中值滤波效果关键是选择合适的窗口大小,不同的窗口大小去噪效果也是不同的。通过各窗口大小对仿真螺纹轮廓数据进行滤波试验,得出选用窗口大小为11时最为合适,如图2所示。

1.2.2 高斯滤波

高斯滤波器是一种线性滤波器,能够有效的抑制噪声,平滑信号^[9]。其作用原理和均值滤波器类似,平滑度由高斯的标准偏差确定,而具有较大标准偏差的高斯函数需要较大的卷积核才能准确表示。高斯滤波输出的是窗口内信号的“加权平均值”,该

平均值的权重更多地朝向中心位置的值,这与均值滤波器的均匀加权平均值相反。所以,高斯滤波器可以提供更柔和的平滑效果。

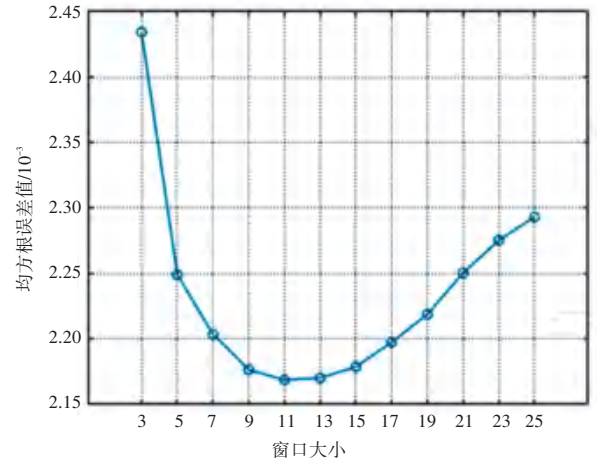


图2 中值滤波窗口大小效果比较

Fig. 2 Comparison of Median Filter Window Size

高斯滤波公式,公式(2):

$$g(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(k-i)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (2)$$

其中, k 表示高斯窗口大小, i 表示高斯窗口主元的第 i 个数, σ 为标准差,决定了高斯函数的宽度。当高斯滤波核的宽度三倍于 σ 时,就囊括了包含99%的信息,所以这里只需要确定窗口大小,用

相同方法进行滤波试验, 选用窗口为 5 时最为合适, 如图 3 所示。

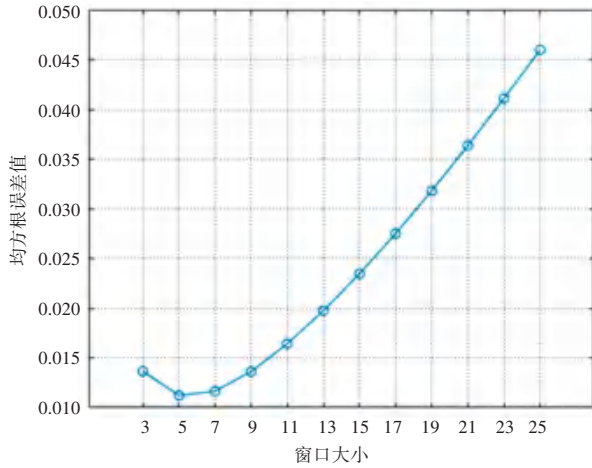


图 3 高斯滤波窗口大小效果比较

Fig. 3 Comparison of Gauss Filtering Window Size

1.2.3 平滑滤波

平滑滤波处理, 把连续取 K 个采样值看成一个队列, 每次将一个新数据放入队尾并扔掉原来队首的一个数据。每次在“滑动”后把队列内的 K 个数据进行算术平均运算, 得到平滑滤波的新数据, 其表达式为公式(3):

$$Y[n] = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} x[n - 1]. \quad (3)$$

其中: K 为选定的滤波窗口大小; $Y[n]$ 为经过平滑滤波后的新数据。平滑滤波对单个脉冲信号的衰减较小^[10], 所以利用平滑滤波处理单个脉冲信号, 可以在抑制噪声的同时尽可能保存信号, 从而提高信噪比。平滑滤波窗口越大, 平滑性越好, 但以牺牲曲线特性为代价^[11]测试结果如图 4 所示, 此次仿真实验选用 3 为窗口大小。

1.2.4 小波滤波

小波滤波以傅立叶变换为基础, 实现在时域和频域内的局部分析, 能从信号中有效的获取局部信息。真实信号在小波分解后的小波系数绝对值比较大, 而噪声分解后的小波系数绝对值较小, 随着小波分解尺度增加, 真实信号的小波变换系数幅值基本不变, 而噪声的小波变换系数幅值很快衰减为零, 由此进行去噪^[12]。

含噪信号模型公式(4)~公式(5):

$$s(t) = f(t) + n(t). \quad (4)$$

式中, $s(t)$ 为含噪信号, $f(t)$ 为真实信号, $n(t)$ 为噪声。

$$WT_s(j, k) = \int s(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt = \int f(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt +$$

$$\int n(t) \overline{\Psi_{j,k}(t)} dt. \quad (5)$$

记为 $w_{j,k} = u_{j,k} + v_{j,k}$.

式中: $\Psi_{j,k}$ 为离散小波; $w_{j,k}$ 为含噪信号 $s(t)$ 的小波变换; $u_{j,k}$ 为真实信号 $f(t)$ 的小波变换; $v_{j,k}$ 为噪声 $n(t)$ 的小波变换。

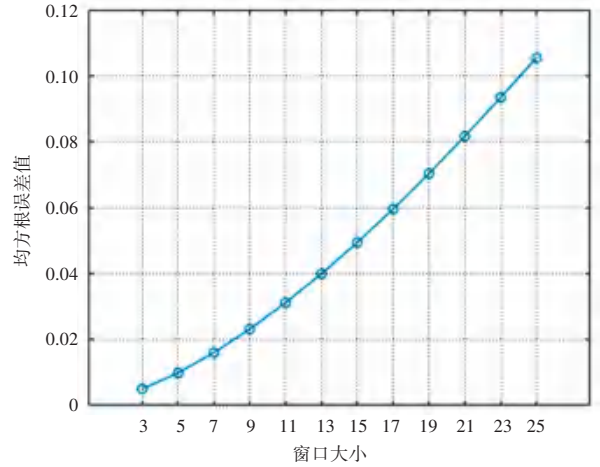


图 4 平滑滤波窗口大小效果比较

Fig. 4 Comparison of Smoothing Filter Window Size

对于螺纹信号的滤波处理, 需要很好的保留信号边缘等局部特征, 这里选用硬阈值^[13], 小波分解层数从理论上讲, 分解层数越多, 去噪的效果越好。但分解层数多会大大提高运算量, 本文根据实际情况选择 6 层分解层数, 通过模拟实验找到最佳的小波基和阈值。本文选取了 19 种小波基, 在固定阈值、启发式阈值、无偏似然估计和极大极小阈值 4 种阈值的情况下对加噪信号进行去噪处理^[14], 根据均方根值误差进行选择。如图 5, 选用 haar 小波基以及固定阈值时效果最佳。

2 螺纹信号仿真

2.1 滤波效果评价

传统的滤波效果评价指标一般有信噪比和均方根误差。

信噪比(SNR)是指原始信号能量与噪声能量的比值, 体现了噪声信号对于整体信息的影响, 信噪比越高, 滤波效果越好。

信噪比计算公式(6):

$$SNR(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\int P_{\text{signal}}}{\int P_{\text{noise}}} = 20 \log_{10} \frac{\int A_{\text{signal}}}{\int A_{\text{noise}}}. \quad (6)$$

其中, P_{signal} 为信号功率; P_{noise} 为噪声功率; A_{signal} 为信号幅值; A_{noise} 为噪声幅值。

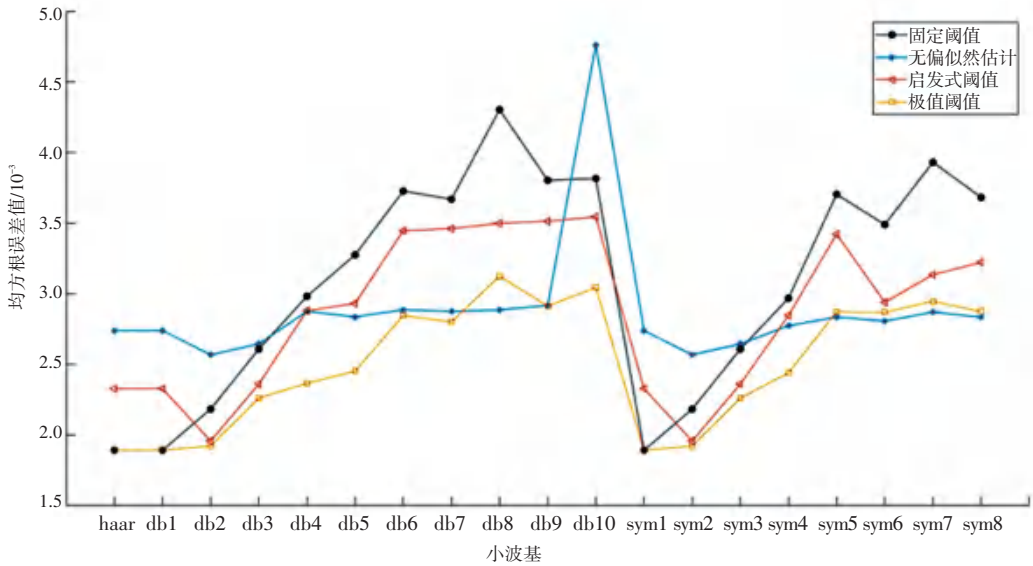


图 5 不同小波基与阈值函数小波滤波效果比较

Fig. 5 Comparison of Wavelet Filtering Effect between Different Wavelet Basis and Threshold Function

均方根误差 (RMSE) 是预测值与真实值偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根, 在实际测量中, 观测次数 n 总是有限的。均方根误差是用来衡量观测值同真值之间的偏差, 一般而言, 均方根误差是指滤波后信号与原信号的均方误差, 体现了信号的细节滤波情况, 均方根误差越小, 表示滤波效果均方根误差越小, 则表示滤波效果越好^[15]。

均方根误差计算公式 (7):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{abs,i} - X_{model,i})^2}. \quad (7)$$

式中, $X_{abs,i}$ 为真值; $X_{model,i}$ 为测量值。

本次所用仿真螺纹轮廓牙形周期采样点个数为 128, 牙顶牙底各 47 个点, 左右牙侧各 17 个点。在计算边缘均方根误差时, 提取每个牙形拐角处的 5 个点, 进行计算衡量边缘保护性。

2.2 仿真结果

本文选用牙形角为 30° 的梯形螺纹作为仿真数据源, 根据实际情况给原始螺纹信号加入 50 db 信噪比的高斯白噪声, 来模拟接触式螺纹检测实际测得的螺纹数据, 再通过本文所提四种方法对其进行处理后, 滤波效果如图 6、7 及表 1 所示。

表 1 各方法滤波效果对比表

Tab. 1 Comparing tables of filtering effects of various methods

	加噪后	中值滤波	高斯滤波	平滑滤波	小波滤波
整体 RMSE	0.003 1	0.002 1	0.011 2	0.005 0	0.001 9
边缘 RMSE	0.002 9	0.003 3	0.018 9	0.024 7	0.002 5
SNR	50.000 0	53.275 8	39.005 5	40.140 2	56.451 0

从整体滤波效果上, 可以看出中值滤波和小波滤波能有效降低螺纹轮廓信号的均方根误差, 分别降低了 32% 和 38%, 提高了信噪比, 而高斯滤波以及平滑滤波效果较差。从边缘保护上, 中值滤波、高斯滤波、平滑滤波在螺纹牙形的拐角处虽然保持了线条的连续性, 但是边缘破坏十分严重, 误差偏大,

且边缘相位失真也十分严重, 而小波滤波效果相对较好, 能降低边缘均方根误差, 降低了 13%。综上所述, 小波滤波通过选取合适的小波基、阈值函数、分解层数等参数可有效去除螺纹轮廓信号的噪声并保护边缘信息。

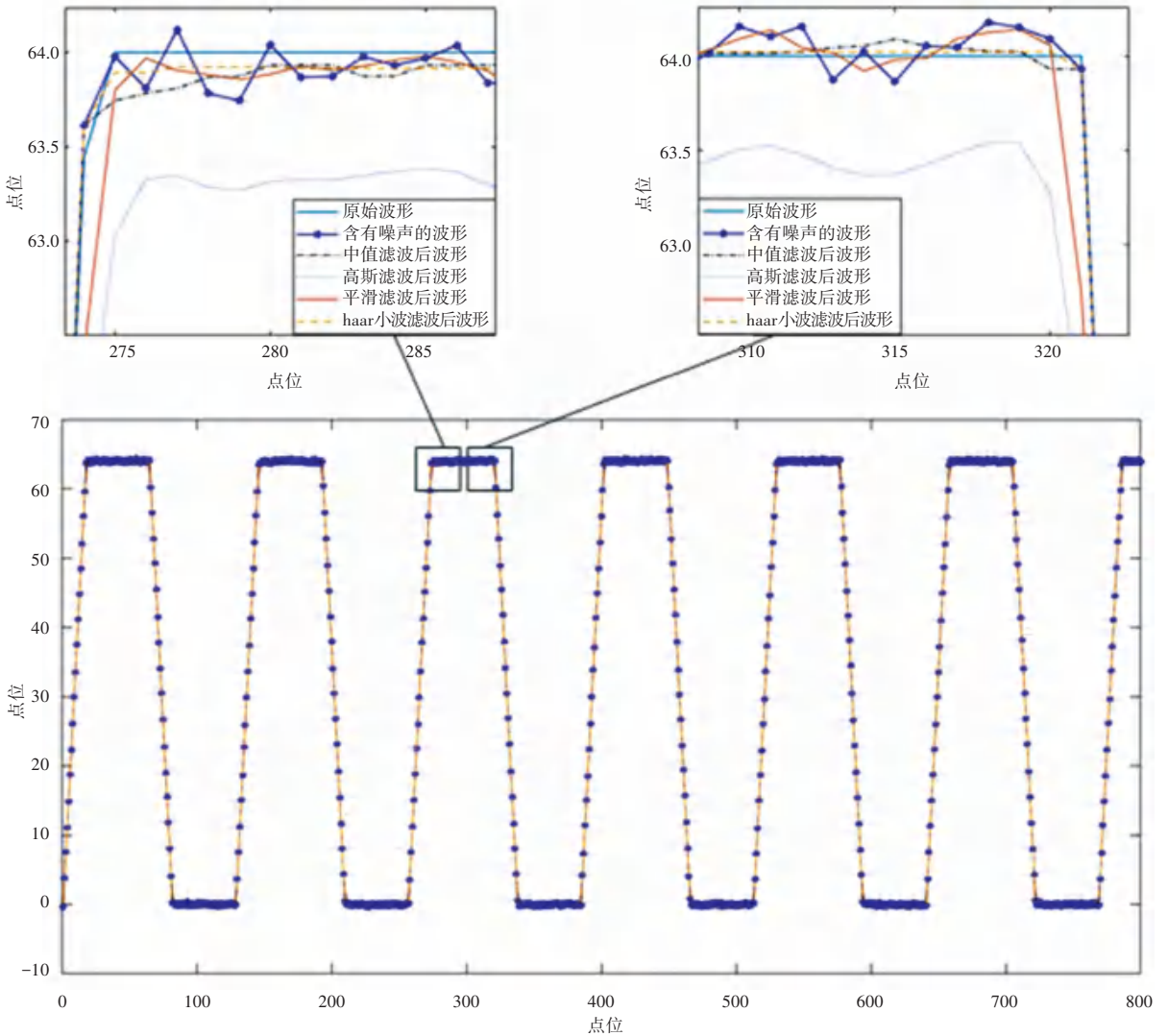


图6 梯形螺纹各方法滤波局部效果图

Fig. 6 Local effect map of trapezoidal threads filtered by various methods

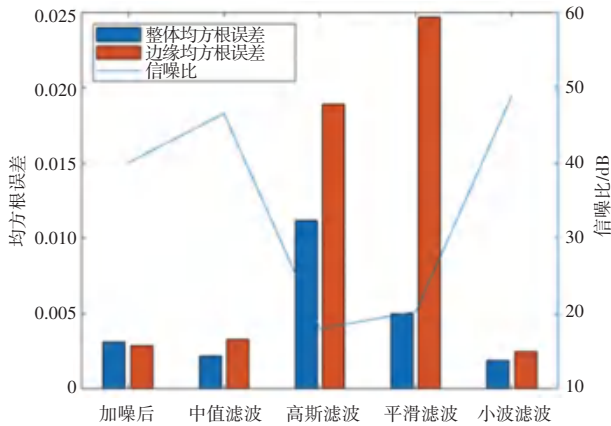


图7 梯形螺纹各方法滤波效果评价对比图

Fig.7 Comparisons of filtering errors of trapezoidal threads by various methods

3 结束语

本文利用 matlab 模拟的接近实测含噪螺纹曲

线,对其进行滤波仿真。分别使用平滑滤波、高斯滤波、中值滤波、小波滤波等四种不同滤波器方法,通过试验选定参数后,对含噪螺纹信号进行滤波处理,计算它们的整体均方根误差和边缘均方根误差以及信噪比来对滤波效果进行评价,结果表明小波滤波效果相对较好,在提高信噪比的同时很好的保护了螺纹牙形角的边缘特征。

参考文献

[1] 张成斌,王开福. 脉冲噪声图像的中-均值滤波算法[J]. 激光与红外,2015,45(7):861-864.

[2] 邓秀勤,熊勇,彭宏. 一种有效的自适应加权中值滤波算法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(35):185-187.

[3] ISO 16610 - 21: Geometrical Product Specifications (GPS) - Filtration - Part 21: Linear Profile Filters; Gaussian Filter [S]. Geneva:ISO,2011.

[4] 刘志杰,张斐. 加速度传感器信号数据处理中滤波算法的应用[J]. 电脑与信息技术,2018,26(3):1-4. (下转第 223 页)