标准及检测

连杆衬套表面粗糙度评定方法对比分析

胥超，樊文欣，赵俊生，梁大珍

（中北大学，太原 030051）

摘 要：目的 准确测量连杆衬套表面粗糙度。**方法** 采用高斯滤波法和小波分析法两种方法对连杆衬套表面粗糙度进行评定，并将评定结果与实测结果作对比。**结果** 高斯滤波和小波法的相对误差分别为 1.7046%和 0.9037%。**结论** 采用高斯滤波和小波分析评定连杆衬套的表面粗糙度都具有可行性，相比之下，小波法的评定结果更为准确。

关键词： 连杆衬套；高斯滤波；小波法；表面粗糙度评定

中图分类号： TG84 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2013)06-0109-04

Comparative Analysis of Evaluation Methods for the Surface Roughness of Connecting Rod Bushings

XU Chao, FAN Wen-xin, ZHAO Jun-sheng, LIANG Da-zhen

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: Objective To measure the surface roughness of connecting rod bushings accurately. **Methods** Use the methods of gaussian filter and wavelet analysis to evaluate the surface roughness of connecting rod bushings, and compare the evaluation results with the measured results. **Results** The respective relative error of Gauss filter and wavelet method was 1.7046% and 0.9037%. **Conclusion** It was verified that both the gaussian filter and wavelet analysis were feasible for the evaluation of the surface roughness of connecting rod bushings, and the evaluation methods of the wavelet method were more accurate.

KEY WORDS: connecting rod bushing; gaussian filter; wavelet method; evaluation of surface roughness

连杆衬套是活塞销和连杆小头的连接部件，是发动机的关键部件之一。在高比压的工作状态下，衬套无论是内表面粗糙度，还是外表面粗糙度，对其工作性能都有很大的影响。因此，对连杆衬套表面粗糙度的评定显得尤为重要。目前来看，对表面粗糙度进行评定的方法有二维方法和三维方法。二维方法评定出的粗糙度参数信息量还不够全面，有时不能正确地反映零件表面的一些特性，因此描述粗糙表面最好采用三维表面粗糙度评定方法。

三维表面粗糙度评定法主要有多项式拟合法、滤

收稿日期： 2013-06-31；**修订日期：** 2013-08-12

Received：2013-06-31；**Revised**：2013-08-12

基金项目： 山西省自然科学基金(2012011023-2)；山西省高校高新技术产业化项目(20120021)

Fund: The project was supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (2012011023-2); the High and New Technology industrialization Project of Shanxi Province Colleges and Universities(20120021)

作者简介： 胥超(1987—)，男，山西长治人，硕士生，主要研究方向为内燃机振动与噪声控制。

Biography: XU Chao (1987—), Male, from Changzhi, Shanxi, Master, Research focus: control of vibration and noise of internal combustion engine.

波法、Motif 法和分形法。滤波法包括高斯滤波和小波法。高斯滤波器作为一种零相移滤波器,被广泛应用于表面特征的分离中,在高斯滤波中,表面被假定为一种正态随机过程[1]。小波法则是通过多尺度变焦特性,将表面信息在不同尺度上进行分离和重构,提取有用信息。文中就是通过分析连杆衬套表面形貌的成分,建立数学模型,分别利用高斯滤波和小波法对连杆衬套的表面粗糙度进行评定,并通过实例分析其结果的优劣性。

1 表面粗糙度评定方法

1.1 数学模型

用$f(x,y)$表示三维表面,则$f(x,y)$是表面粗糙度、表面波纹度、表面形位误差和多尺度成分等多种成分的总和[2]。作为信号,以上各种成分的频率(波长)特征是不相同的。表面粗糙度属于高频信号,相对而言,表面波纹度、表面形位误差及多尺度成分等属于低频信号。

用$f_1(x,y)$表示粗糙度评定基准面,$f_2(x,y)$表示表面粗糙度,则$f_1(x,y)$是表面波纹度、表面形位误差及多尺度成分等低频信号之和。于是粗糙度评定的数学模型为:

$$f(x,y)=f_1(x,y)+f_2(x,y) \tag{1}$$

设三维表面粗糙度与评定基准的分界频率为 ω_0,则$f_1(x,y)$与$f_2(x,y)$的频谱分别满足:

$$\hat{f}_1(\omega_1,\omega_2)=\begin{cases}\hat{f}(\omega_1,\omega_2) & |\omega_1|\leqslant\omega_0 \text{ 且 } |\omega_2|\leqslant\omega_0\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \tag{2}$$

$$\hat{f}_2(\omega_1,\omega_2)=\begin{cases}\hat{f}(\omega_1,\omega_2) & |\omega_1|>\omega_0 \text{ 且 } |\omega_2|>\omega_0\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \tag{3}$$

式中,$\hat{f}(\omega_1,\omega_2)$,$\hat{f}_1(\omega_1,\omega_2)$,$\hat{f}_2(\omega_1,\omega_2)$分别是$f(x,y)$,$f_1(x,y)$,$f_2(x,y)$的二维 Fourier 变换。

1.2 高斯滤波

高斯滤波就是将测量轮廓数据与高斯权函数相卷积的过程[3]。高斯权函数定义为:

$$g(x,y)=\frac{1}{\alpha^2\lambda_{cx}\lambda_{cy}}\exp\left[-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_{cx}}\right)^2-\pi\left(\frac{y}{\alpha\lambda_{cy}}\right)^2\right]=\frac{1}{\alpha^2\lambda_{cx}\lambda_{cy}}\exp\left[\frac{-\pi}{\alpha^2}\left(\frac{x^2}{\lambda_{cx}^2}+\frac{y^2}{\lambda_{cy}^2}\right)\right] \tag{4}$$

式中:λ_{cx}为 x 向截止波长,λ_{cy}为 y 向截止波长。频率响应函数为:

$$G(\lambda_x,\lambda_y)=\exp\left[-\pi\left(\frac{\alpha\lambda_{cx}}{\lambda_x}\right)^2-\pi\left(\frac{\alpha\lambda_{cy}}{\lambda_y}\right)^2\right]=\exp\left[-\pi\alpha^2\left(\frac{\lambda_{cx}^2}{\lambda_x^2}+\frac{\lambda_{cy}^2}{\lambda_y^2}\right)\right] \tag{5}$$

$f_1(x,y)$为三维表面粗糙度高斯评定的基准面,符合以下等式:

$$f_1(x,y)=f(x,y)\cdot g(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}f(\xi,\eta)g(x-\xi,y-\eta)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}g(\xi,\eta)f(x-\xi,y-\eta)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \tag{6}$$

高频粗糙度信号为:

$$f_2(x,y)=f(x,y)-f_1(x,y) \tag{7}$$

由于测量中的采样点是离散的,因此将式(6)和(7)离散化即可。

1.3 小波分析

1.3.1 模型的小波构造原理

首先对三维表面信号$f(x,y)$进行小波分解[4]:

$$W_{j,k}(f)=\langle f(x,y),\tilde{\psi}_{j,k}(x,y)\rangle=(Ca_{j,k},Cd_{j,k1},\cdots,Cd_{J,kJ},\cdots,Cd_{j,k}) \tag{8}$$

式中:$Ca_{j,k}=\langle A_{j-1}(x,y),\tilde{\varphi}_{j,k}(x,y)\rangle$。$Ca_{j,k}$和 $Cd_{j,k}$分别代表低频和高频成分在尺度2^{-j}上的系数。

信号的低频成分 $A_j(x,y)$可表示为:

$$A_j(x,y)=\sum_k Ca_{j,k}(x,y)\varphi_{j,k}(x,y)=\sum_k\langle A_{j-1}(x,y),\tilde{\varphi}_{j,k}(x,y)\rangle\varphi_{j,k}(x,y) \tag{9}$$

信号的高频成分 $D_j(x,y)$可表示为:

$$D_j(x,y)=\sum_k Cd_{j,k}(x,y)\psi_{j,k}(x,y)=\sum_k Cd_{j,k}^h\psi_{j,k}^h(x,y)+\sum_k Cd_{j,k}^v\psi_{j,k}^v(x,y)+\sum_k Cd_{j,k}^d\psi_{j,k}^d(x,y) \tag{10}$$

$$Cd_{j,k}=\begin{cases}Cd_{j,k}^h=\langle A_{j-1}(x,y),\tilde{\psi}_{j,k}^h(x,y)\rangle\\ Cd_{j,k}^v=\langle A_{j-1}(x,y),\tilde{\psi}_{j,k}^v(x,y)\rangle\\ Cd_{j,k}^d=\langle A_{j-1}(x,y),\tilde{\psi}_{j,k}^d(x,y)\rangle\end{cases} \tag{11}$$

所以:

$$\eta(x,y)=\sum_1^j D_j(x,y)=\sum\sum Cd_{j,k}^{\mathrm{soft}}\psi_{j,k}(x,y) \tag{12}$$

$$\eta'(x,y)=\sum_J^j D_j(x,y)=\sum\sum Cd_{j,k}^{\mathrm{soft}}\psi_{j,k}(x,y) \tag{13}$$

$$\eta''=A_j(x,y)=f(x,y)-\sum_J^j D_j(x,y) \tag{14}$$

$$\zeta(x,y)=\sum_j D_j(x,y)=\sum\sum Cd_{j,k}^{\mathrm{hard}}(x,y) \tag{15}$$

式中:$Cd_{j,k}^{\mathrm{soft}}=\begin{cases}Cd_{j,k} & |Cd_{j,k}|<3\sigma_j\\ \mathrm{sgn}(Cd_{j,k})(3\sigma_j) & |Cd_{j,k}|\geqslant3\sigma_j\end{cases}$,$Cd_{j,k}^{\mathrm{hard}}=$

$\begin{cases}0 & |Cd_{j,k}|<2\sigma_j \\ Cd_{j,k} & |Cd_{j,k}|\geqslant 2\sigma_j\end{cases}$，$\sigma_j=\sqrt{\left(\frac{1}{K}\sum_{K=1}^{K}Cd_{j,k}^2\right)}$。其中，$\eta(x,y)$，$\eta'(x,y)$，$\eta''(x,y)$，$\zeta(x,y)$分别表示表面粗糙度、表面波纹度、表面形状误差和多尺度成分，$\tilde{\varphi}(x,y)$，$\varphi(x,y)$分别表示分解和重构的尺度函数，$\tilde{\psi}(x,y)$，$\psi(x,y)$分别表示分解和重构的小波函数，$Cd_{j,k}^{\text{soft}}$为软阈值估计，$Cd_{j,k}^{\text{hard}}$为硬阈值估计。则有：

$$f(x,y)=\eta(x,y)+\eta'(x,y)+\eta''(x,y)+\zeta(x,y) \quad (16)$$

联立公式(1)解得：粗糙度评定基准面$f_1(x,y)=\eta'(x,y)+\eta''(x,y)+\zeta(x,y)$，表面粗糙度$f_2(x,y)=\eta(x,y)$。

1.3.2　小波分解层次的确定

记$f(n_1T,n_2T)$ $(n_1,n_2=1,2,\cdots,M)$为曲面$f(x,y)$的离散采样，T为采样间隔。根据给定的分界频率ω_0，求$N=[(\ln\Omega-\ln\omega_0)/\ln 2+0.5]$，[ ]表示取整运算，其中$\Omega=\pi/T$[5]。可以看出，对于粗糙度不同的工件，粗糙度与评定基准分界频率和采样间距是不相同的，因此小波分解层数N的取值要视实际情况而定。

1.3.3　小波滤波器的选择

文中选用 Daubechies 小波系，通常记为 db$N$，这里的N为小波的序号，取值为 2，3，4，…，10。它非常适合对数据进行分解和重构。Daubechies 系小波的正则性随着序号N的增大而增大，且该函数系具有正交性。

2　表面粗糙度评定算法对比分析

文中使用 JB-5C 触针式轮廓仪对连杆衬套进行三维表面形貌测量，并采集数据。对于针触式测量仪，只需选好合适的参数，调整好触针的水平高度就可以测量。文中采取了横向和纵向等间距采样取点，以获得所需的数据点。选取截止波长和取样长度相同，即$\lambda_{cx}=\lambda_{cy}=l_r=1$ mm，采样间距为 0.125 mm。采集表面轮廓 200 个点，以横向 10 个，纵向 20 个分布。运用 Matlab 编制程序画出衬套表面形貌的原始数据图，如图 1 所示。

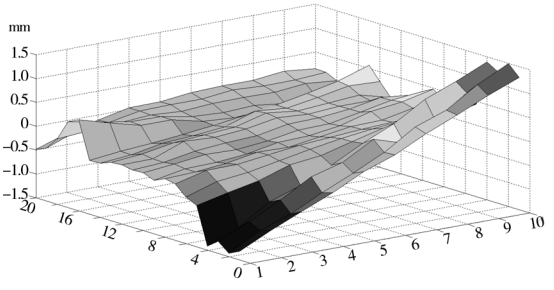


图 1　连杆衬套原始轮廓面

Fig. 1 Original contour surface of the connecting rod bushings

利用高斯滤波法对表面测量数据进行分析处理，结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，使用高斯滤波得到的基准面光滑自然，与原始轮廓面高低起伏走势大致相同，但在轮廓信号的边缘部分出现了部分数据的失真现象，这是由于高斯滤波器存在边界效应的原因。要使评定结果更加准确，就要对轮廓的边缘失真数据进行修正，使得高斯滤波的计算结果更接近真实值。

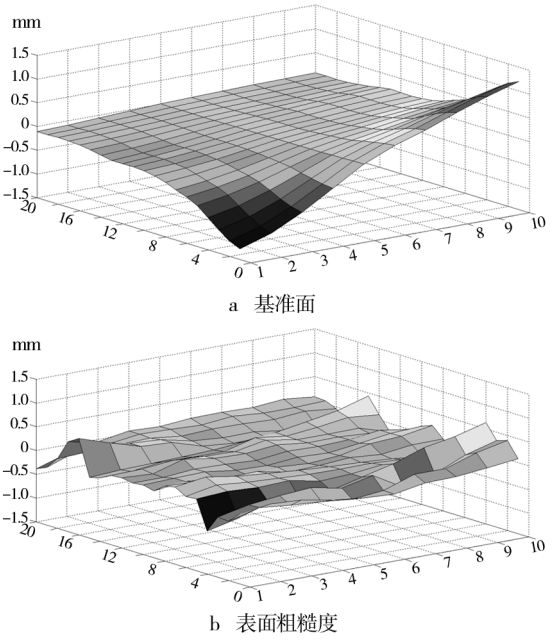


图 2　高斯滤波评定

Fig. 2 Gaussian filter evaluation

利用小波分析法对衬套表面轮廓数据进行 3 层分解，得到了评定粗糙度的小波基准面和三维表面粗糙度，如图 3 所示。小波基准面光滑自然，与原始轮廓面

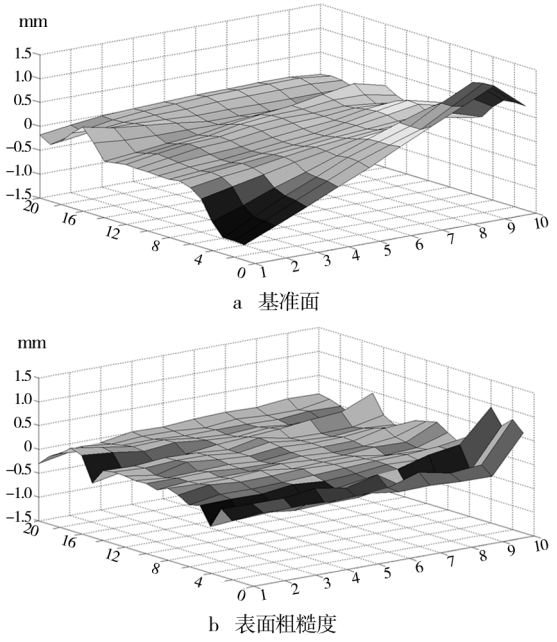


图 3　小波评定

Fig. 3 Wavelet assessment

高低起伏走势很接近。这是由于小波函数中小波基光滑自然,没有特定的函数形式,它避免了因为拟合而引起的误差,克服了函数拟合等回归方法的不足。通过小波法评定出的表面粗糙度更为精确。

根据三维表面粗糙度评定参数的定义及数值算法(如式(17)所示),计算出了表面轮廓算术平均偏差 S_a,见表1。

$$S_a = \frac{1}{A}\iint_D |f_2(x,y)|\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y = \frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}|f_2(x_i,y_j)| \quad (17)$$

表1 连杆衬套表面粗糙度评定对比

Tab.1 Comparision of the surface roughness of connecting rod bushings

评定方法	高斯滤波	小波法
测量值 S_a/μm	15.5695	15.5695
评定计算值 S_a/μm	15.8349	15.7102
绝对误差/μm	0.2654	0.1407
相对误差/%	1.7046	0.9037

从表1中的数据可以看出,对于三维表面轮廓的算术平均偏差 S_a,高斯滤波和小波法计算值与测量值的相对误差分别为1.7046%和0.9037%。二者的误差都不是很大,可信度较高,所以这两种方法都可以运用于连杆衬套的表面粗糙度评定,其中小波法的评定结果比高斯滤波的评定结果更接近真实值。

3 结论

连杆衬套表面形貌中包含了表面粗糙度、表面波纹度、表面形位误差和多尺度成分等多种不同频率成分。高斯滤波是利用权函数与表面轮廓数据卷积,然后分离出衬套表面形貌中的低频部分,但是由于高斯滤波器权函数的影响,会产生边界效应,从而使评定的基准面在边缘部分出现失真现象,进而影响评定结果。小波法引入了表面形貌的多尺度特性分析,通过小波的分解和重构原理,提取小波基准面和表面的粗糙度。通过实例对比分析,这两种方法在衬套表面粗糙度的评定中都较为精确,适用于工程实际。其中小波法由于其独特的特性,在时域和频域上具有良好的局部化特性,可以聚焦到表面轮廓的任意细节,用于连杆衬套表面粗糙度的评定中具有更高的精确性。

参考文献

[1] 张耕培,崔长彩. 小波滤波在表面形貌评定和分析中的应用[J]. 华侨大学学报,2010,31(2):141—144.
ZHANG Geng-pei, CUI Chang-cai. Surface Morphology Evaluation and Analysis Based on Wavelet Filtering[J]. Journal of Huaqiao University,2010,31(2):141—144.

[2] 陈庆虎,李柱. 表面粗糙度提取的小波频谱法[J]. 机械工程学报,1999,35(3):41—43.
CHEN Qing-hu, LI Zhu. Method of Wavelet for Picking up Surface Roughness[J]. Chinese Jouurnal of Mechanical Engineering,1999,35(3):41—43.

[3] 曾文涵,高咏生,谢铁邦,等. 三维表面粗糙度高斯滤波快速算法[J]. 计量学报,2003,24(1):10—13.
ZENG Wen-han, GAO Yong-sheng, XIE Tie-bang, et al. A Fast Gauss Filtering Algorithm for 3D Surface Roughness [J]. Acta Metrologica Sinica,2003,24(1):10—13.

[4] JIANG X Q, BLUNT L, STOUT K J. Three-dimensional Surface Characterization for Orthopaedic Joint Prostheses[J]. Journal of Engineering in Medicine,1999,213:49—68.

[5] 唐焱,刘栋,侯原亮,等. 基于MATLAB GUI的表面粗糙度评定算法的实现[J]. 机械设计与研究,2012,28(5):52—55.
TANG Yan, LIU Dong, HOU Yuan-liang, et al. Realizing the Evaluation Algorithm of Surface Roughness Based on MATLAB GUI[J]. Machine Design and Research,2002,28(5):52—55.

(上接第108页)

[3] 刘维民. 汽车阴极电泳漆膜缩孔的消除[J]. 涂料工业,1998,12:24—25.
LIU Wei-min. Eliminating Craters of Ced Paint Film for Automobile[J]. Paint & Coatings Industry,1998,12:24—25.

[4] YAMOTO S, SUDA K, MURASE K. Crater Inhibiting Method and Crater Inhibiting Agent for Cationic Electrodeposition Coating Composition: US,6881313[P]. 2005-04-19.

[5] GAM A, MI T. Anticrater Agent for Electrocoat Composition: US,20120175261[P]. 2012-07-12.

[6] TRINKLEIN D W, MICH R. Method to Evaluate Sheet Metal Lubricants Cratering Potential on Metal Primer: US,4663007[P]. 1987-05-05.

[7] WICKS D A, WICKS Jr Z W. Blocked Isocyanates III: Part A. Mechanisms and Chemistry[J]. Progress in Organic Coatings,1999,36:148—172.