标准及检测

改进中值滤波和最小二乘法在三维表面评定中的应用

炊明伟[1]，冯有前[2]，王崴[1]，李正朝[3]，徐晓东[1]
（1. 空军工程大学 防空反导学院，西安 710051；2. 空军工程大学 理学院，西安 710051；
3. 解放军洛阳外国语学院，洛阳 471003）

[摘 要] 为保证三维表面形貌评定的准确性，消除测量过程中产生的脉冲噪声和基准偏斜面的影响，提出了一种基于改进中值滤波和最小二乘法的三维表面形貌评定方法。该方法通过改进中值滤波去除表面形貌测量中产生的脉冲噪声，采用最小二乘法提取基准偏斜面，表面形貌去除脉冲噪声和测量基准偏斜面后得到评定表面形貌，在此基础上，通过高斯滤波法提取粗糙度表面，并计算表面形貌典型评定参数。实验结果表明，评定表面形貌的典型评定参数可更加准确地评定三维表面形貌。

[关键词] 改进中值滤波；最小二乘法；三维表面形貌；表面评定
[中图分类号]TG84 [文献标识码]A [文章编号]1001-3660(2012)06-0118-04

The Application of the Improved Median Filter and Least Square Method in Evaluation of 3D Surface Topography

CHUI Ming-wei[1], *FENG You-qian*[2], *WANG Wei*[1], *LI Zheng-chao*[3], *XU Xiao-dong*[1]
(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi´an 710051, China;
2. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi´an 710051, China;
3. Luoyang PLA Foreign Language Institute, Luoyang 471003, China)

[**Abstract**] In order to ensure the accuracy evaluation of 3D surface topography, and eliminate the effect of impulse noise and basic deflection surface generated in measuring process, an evaluation method of 3D surface topography was proposed based on the improved median filter and least square method. The impulse noise of 3D surface topography was removed by the improved median filter, and the basic deflection surface was generated by the least square method. The evaluation surface was generated by removing the impulse noise and basic deflection surface, and the roughness surface was extracted by the Gaussian filter method and the typical evaluation parameters were calculated. The experimental result shows that the typical evaluation parameters of the evaluation surface can more exactly reflect 3D surface topography.

[**Key words**] improved median filter; least square method; 3D surface topography; surface evaluation

机械零部件的表面形貌对机械系统的精度、可靠性、使用寿命等具有重要影响[1-2]，因此，表面形貌的分析和评价受到越来越多的关注。由于表面形貌的测定过程中，环境和仪器会对其产生脉冲噪声干扰，从而影响分析评定。为消除脉冲噪声的影响，人们提出了多种滤波方法，其中，中值滤波算法是应用较广泛的一种。中值滤波对脉冲噪声有较好的抑制效果，但在细节保留方面不够理想。为此，人们又提出了各种改进的中值滤波算法[3-5]。不过这些改进的中值滤波算法，要么缺乏判断噪声点的方法，要么判断方法简单而易造成噪声点的误判，这都会造成滤波效果不理想。为此，笔者基于滤波窗口的局部信息，提出了一种新的改进中值滤波算法。

载物台和测量仪器相对待测表面存在的偏差会使获得的表面形貌含有测量基准偏斜面，进而影响最终评定结果的准确性。为此，文中在分析评定之前，根据

[收稿日期]2012-07-15；[修回日期]2012-08-17
[基金项目]国家自然科学基金资助项目(51075395)
[作者简介]炊明伟(1985—)，男，河南洛阳人，博士，主要研究方向为信号与信息处理。

滤波后的表面形貌数据,采用最小二乘法求出近似的测量基准偏斜面,将测量基准偏斜面从表面形貌测量结果中消除,得到最终的评定表面形貌。

1 三维表面主要评定参数

三维表面形貌复杂多变,难以通过单一的参数进行描述。为说明文中方法的有效性,选取以下四个典型参数作为分析评定表面形貌的主要参考[7]。

1) 表面形貌高度分布的算术平均偏差 S_a:

$$S_a = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left|Z(i,j)\right| \tag{1}$$

2) 表面形貌高度分布的均方根偏差 S_q:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}Z^2(i,j)} \tag{2}$$

3) 表面形貌高度分布的偏斜度 S_{sk}:

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}Z^3(i,j) \tag{3}$$

4) 表面形貌高度分布的峭度 S_{ku}:

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}Z^4(i,j) \tag{4}$$

2 改进中值滤波

改进的中值滤波法是首先根据含噪表面形貌采样数据滤波窗口的局部信息,判断滤波窗口内采样点(含待处理采样点)是否为噪声点,然后根据非噪声点组成的新滤波窗口进行滤波操作。为充分利用滤波结果,通过迭代法不断更新表面形貌中的采样点信息。

在大小为 $M\times N$ 的三维表面形貌 S 中,$S_{i,j}(1\leqslant i\leqslant M,1\leqslant j\leqslant N)$ 表示表面形貌中某一个采样点的高度值,$D_{i,j}$ 表示以 $S_{i,j}$ 为中心采样点的滤波窗口,滤波窗口可取多种类型和尺寸,文中取 3×3 的方形滤波窗口。对于表面形貌的边界点,为保证滤波窗口构造的一致性,用以中心采样点为中心的对称采样点代替不存在的采样点。

设 $\mu_{i,j}$ 和 $\sigma_{i,j}$ 分别为滤波窗口 $D_{i,j}$ 中采样点高度值的均值和标准差,$\alpha_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$ 分别为滤波窗口 $D_{i,j}$ 的极大值、极小值,则:

$$\alpha_{i,j}=\mu_{i,j}+3\sigma_{i,j} \tag{5}$$

$$\beta_{i,j}=\mu_{i,j}-3\sigma_{i,j} \tag{6}$$

定义滤波窗口 $D_{i,j}$ 中高度值大于极大值 $\alpha_{i,j}$ 或小于极小值 $\beta_{i,j}$ 的采样点为噪声点。剔除滤波窗口 $D_{i,j}$ 中的噪声点,得到新的滤波窗口 $D'_{i,j}$。定义滤波窗口 $D'_{i,j}$ 中的采样点总数为 $\lambda_{i,j}$,$\varphi_{i,j}$ 表示中心采样点 $S_{i,j}$ 是否为极值点,当 $S_{i,j}\notin D'_{i,j}$,即 $S_{i,j}$ 为噪声点时,$\varphi_{i,j}=0$,否则 $\varphi_{i,j}=1$。$\mu'_{i,j}$ 和 $\sigma'_{i,j}$ 分别表示滤波窗口 $D'_{i,j}$ 中采样点高度值的均值和标准差。采样点处理步骤如下:

1) 当 $\lambda_{i,j}=0$ 时,滤波窗口 $D_{i,j}$ 中的采样点全部为噪声点,这可能是由于中心采样点 $S_{i,j}$ 是表面形貌中的极值点。因此,取滤波窗口 $D_{i,j}$ 的中值为采样点 $S_{i,j}$ 滤波后的高度值 $S'_{i,j}$,即 $S'_{i,j}=D_{i,j(\text{中值})}$。

2) 当 $\lambda_{i,j}>0$ 且 $\varphi_{i,j}=0$ 时,中心采样点 $S_{i,j}$ 是噪声点,则 $S'_{i,j}=D_{i,j(\text{中值})}$。

3) 当 $0<\lambda_{i,j}<5$ 且 $\varphi_{i,j}=1$ 时,中心采样点 $S_{i,j}$ 为非噪声点,则 $S'_{i,j}=S_{i,j}$。

4) 当 $\lambda_{i,j}>4$ 且 $\varphi_{i,j}=1$ 时,通过滤波窗口 $D_{i,j}$ 中的采样点判断中心采样点 $S_{i,j}$ 是否为噪声点。当中心采样点 $S_{i,j}$ 满足 $\left|S_{i,j}-\mu'_{i,j}\right|>3\sigma'_{i,j}$ 时,中心采样点 $S_{i,j}$ 为噪声点,则 $S'_{i,j}=D_{i,j(\text{中值})}$;否则中心采样点 $S_{i,j}$ 为表面形貌真实采样点,高度值保持不变,即 $S'_{i,j}=S_{i,j}$。

重复以上四个步骤处理表面形貌中的每个采样点,以滤波后采样点的高度值更新表面形貌采样数据,最终得到的滤波结果即为滤除脉冲噪声的表面形貌。

3 最小二乘法

对于尺寸为 $M\times N$ 的表面形貌 $S_{i,j}(i=1,2,\cdots,M;j=1,2,\cdots,N)$,其基准偏斜面为 $\psi_{i,j}$,去除基准偏斜面后的表面形貌为 $C_{i,j}$,则:

$$C_{i,j}=S_{i,j}-\psi_{i,j} \tag{7}$$

假设基准偏斜面 $\psi_{i,j}$ 的平面方程为:

$$\psi_{i,j}=ai+bj+c \tag{8}$$

根据最小二乘法,可以对表面形貌上各点在 Z 轴方向到基准偏斜面距离的平方和取最小,以此来近似计算基准偏斜面,即:

$$\begin{aligned}\varepsilon^2 &= \min\left[\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}(S_{i,j}-\psi_{i,j})^2\right]\\ &= \min\left[\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}(S_{i,j}-ai-bj-c)^2\right]\end{aligned} \tag{9}$$

通过求解联立方程组(10),可得到满足公式(9)的基准偏斜面方程的系数 a,b 和 c。

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial a}=0,\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial b}=0,\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial c}=0 \tag{10}$$

4 高斯滤波

受多种加工工艺影响,零件典型的三维表面形貌一般由不同纹理频带特征的成分组成。设 $S(x,y)$ 是零件三维表面形貌,则:

$$S(x,y)=R(x,y)+F(x,y) \tag{11}$$

其中，高频成分 $R(x,y)$ 表示表面粗糙度成分，低频成分 $F(x,y)$ 表示形状和波纹度误差。为进行表面形貌的相关分析，需通过滤波方法将不同的频带成分提取出来，高斯滤波是最常用的一种方法。高斯滤波器权函数的定义为[6]：

$$g(x,y)=\frac{1}{\alpha^2\lambda_{cx}\lambda_{cy}}\exp\left[-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_{cx}}\right)^2-\pi\left(\frac{x}{\alpha\lambda_{cy}}\right)^2\right] \tag{12}$$

其中，λ_{cx} 和 λ_{cy} 分别是 x,y 方向上的截止波长，高斯滤波器的传输特性为 50%，所以 $\alpha=0.4697$。形状和波纹度误差构成的基准面为：

$$F(x,y)=S(x,y)g(x,y) \tag{13}$$

零件三维表面形貌中的粗糙度成分为：

$$R(x,y)=S(x,y)-F(x,y) \tag{14}$$

5　算法流程

针对测得的三维表面形貌，通过改进的中值滤波法去除混杂的脉冲噪声，采用最小二乘法求出近似的基准偏斜面，将基准偏斜面从去噪后的表面形貌中取出，得到最终的评定表面形貌。最后根据高斯滤波法得到表面的粗糙度形貌，计算相关评价参数。具体的算法流程如图 1 所示。

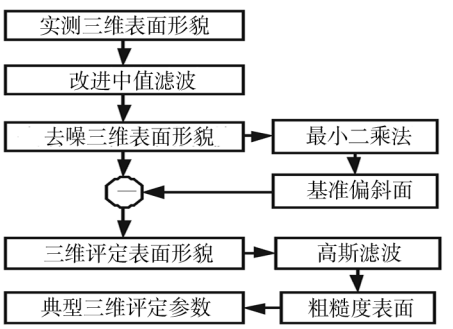


图 1　三维表面形貌评定流程

Fig. 1 The evaluation flow of 3D surface topography

6　实验分析

采用本方法评价了一个零件的三维表面形貌，以验证本方法的有效性。通过奥林巴斯 OLS4000 型共聚焦显微镜获得零件的表面形貌（图 2），利用前述改进中值滤波算法对该表面形貌数据进行滤波处理，得到去噪后的表面形貌，如图 3 所示。图 4 是采用最小二乘法求出的基准偏斜面，图 5 是去噪表面形貌剔除基准偏斜面后得到的评价表面形貌。图 6 是采用高斯滤波，根据评价表面形貌得到的粗糙度表面形貌。

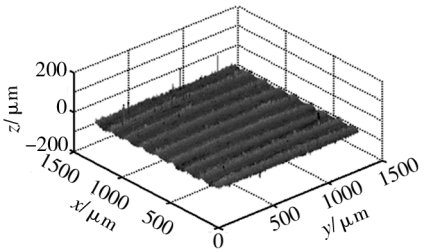


图 2　实测三维表面形貌

Fig. 2 The measured 3D surface topography

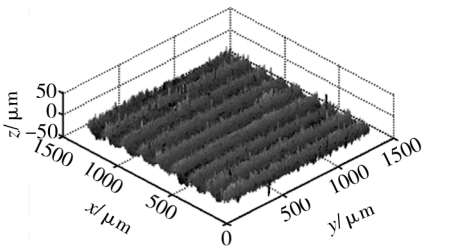


图 3　改进中值滤波后的表面形貌

Fig. 3 3D surface topography after improved median filter

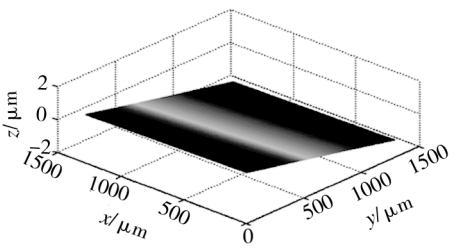


图 4　基准偏斜面

Fig. 4 The basic deflection surface

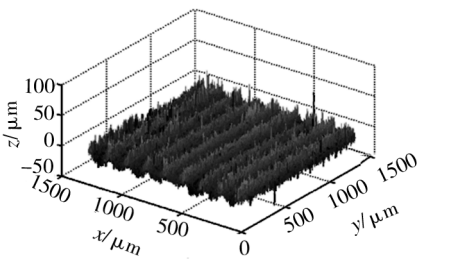


图 5　三维评价表面形貌

Fig. 5 3D evaluation surface topography

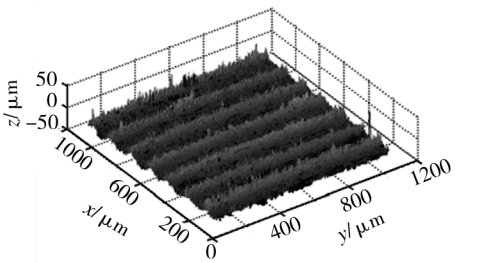


图 6　三维表面粗糙度

Fig. 6 3D roughness surface

由图 2 和图 3 可看出，实测三维表面形貌存在大

量脉冲噪声,利用改进的中值滤波可有效滤除脉冲噪声。由图 4 和图 5 可知,测得的三维表面形貌受测量仪器的影响,存在基准偏斜面,通过最小二乘法求出近似偏斜面后,这种偏斜面得以有效消除。为进一步验证本方法的有效性,通过高斯滤波法分别实测了表面形貌、去噪表面形貌和评价表面形貌的三维粗糙度表面,并计算了粗糙度表面的主要参数,见表 1。

表 1 三维粗糙表面的主要参数

Tab. 1 The main parameters of 3D rough surface

	S_a	S_q	S_{ku}	S_{sk}
原始表面/μm	4.98	6.64	0.26	5.72
去噪表面形貌/μm	4.91	6.51	0.27	4.43
去噪表面与原始表面对比/%	1.63	1.92	-3.95	22.58
评定表面形貌/μm	4.89	6.49	0.28	4.47
评定表面与原始表面对比/%	1.87	2.18	-7.04	21.89

由表 1 可知,由于脉冲噪声和基准偏斜面的存在,实测表面形貌经过改进中值滤波和基准偏斜面去除处理后,三维粗糙度表面的相关评价参数存在变化,其中表面形貌高度分布的偏斜度 S_{sk} 和峭度 S_{ku} 变化较大,算术平均偏差 S_a 和均方根偏差 S_q 的变化相对较小。

7 结语

为准确评价三维表面形貌,消除在测量过程中产生的脉冲噪声和基准偏斜面对评价结果的影响,采用改进中值滤波法处理表面形貌中混杂的脉冲噪声,采用最小二乘法求出近似的基准偏斜面,并将基准偏斜面从表面形貌中剔除,从而保证了表面形貌最终评价结果的准确性。但是,在测量表面形貌的过程中,受各种外界因素的干扰,实际测得的表面形貌中还存在其它干扰噪声,如高斯噪声。因此,为保证分析评定结果的准确性,还需通过其它滤波方法对表面形貌数据进行进一步处理。

[参 考 文 献]

[1] JIANG X, SCOTT P J, WHITEHOUSE D J, et al. Paradigm Shifts in Surface Metrology. Part I. Historical Philosophy[J]. Proceedings of the Royal Society, 2007, 463: 2049—2070.

[2] JIANG X, SCOTT P J, WHITEHOUSE D J, et al. Paradigm Shifts in Surface Metrology. Part II. The Current Shift[J]. Proceedings of the Royal Society, 2007, 467: 2071—2099.

[3] 苟中魁,张少军,李忠富,等. 一种基于极值的自适应中值滤波算法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 98—101.

[4] 唐斌兵,王正明,汪雄良. 一种含椒盐噪声图像去噪的新方法[J]. 系统工程, 2008, 26(10): 123—126.

[5] 钟灵,章云. 双阈值开关型矢量中值滤波[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2367—2369.

[6] 张耕培,崔长彩. 高斯滤波在三维表面评定中的应用[J]. 装备制造技术, 2008(11): 4—6.

[7] 崔长彩,张耕培,张彬,等. 小波滤波及奇异性分析在表面形貌评定中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2255—2260.

(上接第 114 页)

的要求。

反应型单体丙烯酸十八烷基酯不能改善体系的质量损失现象。加入单体总质量 5% 以上的硬脂酸,可以显着改善体系的质量损失现象,但反应开始时间会有所延后,固化时间也相应延长。大分子蜡状惰性组分可以改善体系的质量损失现象,且添加少量就具有明显的效果,但惰性组分会使反应的剧烈程度增加,需严格控制其添加量。

总之,选用蜡状惰性组分表面封闭剂,可改善涂膜各项性能,避免反应固化初期涂层的严重质量损失现象,显著降低 MMA 类涂料在使用过程中的 VOC 排放,保证 MMA/BA 反应成膜的完全性。

[参 考 文 献]

[1] 段艳琴,王进,陈立彬. 一种客运专线用防水涂料的研制[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 65—68.

[2] 褚建军,康杰分,沈春林. 高铁客运专线桥梁用高强度聚氨酯防水涂料的研制[J]. 新型建筑材料, 2008(7): 49—52.

[3] WALLACE L, TAI H, LAM S, et al. Personal Exposures, Indoor Outdoor Relationships and Breath Levels of Toxic Air Pollutants Measured for 355 Persons in New Jersey[J]. Atoms Environ, 1985, 19(11): 652—661.

[4] RODRIGUES J M E, PEREIRA M R, SOUZA de A G, et al. DSC Monitoring of the Cure Kinetics of a Castor Oil-based Polyurethane[J]. Thermochimica Acta, 2005, 427: 31—36.

[5] ABOU RICH S, YEDJI M, AMADOU J, et al. Polymer Coatings of Functionalize Carbon Nanotubes[J]. Physica E, 2012, 44: 1012—1020.

[6] 杜晶晶,许利剑,郭雪梨. 全息涂料用丙烯酸树脂的合成工艺研究[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 1—3.

[7] SCHROETER S H, MOORE J E. Ultraviolet Cure of Solventless Resins. Pollution Free Method[M]. New York: Plenum Publishing, 1973.