

文章编号 1004-924X(2016)增-0135-06

表面三维轮廓的粗糙度评定

刘泊*, 齐兴华, 张明

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了更直观地获取样块表面三维轮廓的粗糙度信息, 以衡量所测试零件的表面质量, 进而衡量其加工工艺的优劣以及能否满足设计要求, 研究了一种表面三维形貌的评定方式。利用白光相移干涉系统测量标准样块的表面三维轮廓数据, 建立高斯评定基准面并提取粗糙度数据, 数据处理后对最为重要的幅度参数和综合参数加以计算, 分析各个参数所反映的表面三维结构特征, 并对标准样块的表面形貌进行了全面综合分析。实验结果显示, 均方根偏差与粗糙度的比值为 1.04, 表面十点高度为 $0.059 \mu\text{m}$, 偏斜度大于 0, 陡度小于 3, 均方根斜率为 $2.993 \mu\text{m}$, 表面峰曲率算数平均值为 $0.181 \mu\text{m}$ 。该实验结果符合研磨样板表面轮廓的分布特征, 并且与用轮廓仪的测量结果相符。

关键词: 三维形貌测量; 白光相移干涉; 粗糙度; 粗糙度评定

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0135

Roughness evaluation of 3D surface profile

LIU Bo*, QI Xing-hua, ZHANG Ming

(School of Measurement-Control Technology and Communications Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: lb0303@263.net

Abstract: To directly capture the roughness of the three-dimensional surface profile for surface quality evaluation of the tested parts, thus weighing its processing technology and whether relevant design requirements are satisfied, an evaluation method for the three-dimensional surface profile was put forward. Relevant data on three-dimensional surface profile of the standard sample piece was measured by using the white-light phase-shifting interference system. Then the Gaussian reference plane was set up and the roughness data was extracted. The most important parameters such as amplitude and integrated parameters were calculated after data processing, for analyzing structural feature of the three-dimensional surface reflected by each parameter. Finally the surface profile of the standard block was analyzed comprehensively. The results show that the ratio of the root-mean-square deviation to roughness is 1.04, and ten-point height of the surface is $0.059 \mu\text{m}$; the degree of skewness is greater than 0 and gradient less than 3; the root-mean-square(RMS) slope is $2.993 \mu\text{m}$, and average curvature of roughness peaks is $0.181 \mu\text{m}$. The experimental results conform to distribution characteristics of the surface profile of the grinding template, and in consistence with the measuring values by contourgraph.

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(No. F201303)

Key words: three dimensional measurement; white-light phase-shifting interference; roughness; roughness evaluation

1 引言

随着工业化的不断发展,国防、工业等领域对工件及器械表面的机械加工质量的要求越来越高。工件表面的粗糙度影响着零件间的啮合程度、零件的刚度及耐磨性等,特别是对于一些在恶劣条件下工作的器械,器件的表面粗糙度会在很大程度上影响机械的性能、可靠性以及使用寿命,因此对于工件表面粗糙度评定技术的研究是十分必要的。

近年来,计算机技术的飞速发展带动着图像处理、数据信号处理等技术的不断提高,表面粗糙度评定随之从传统的二维评定转向三维的综合功能评定^[1-2]。国内外学者在表面三维粗糙度的提取与评定方面做了大量的研究,但仍然没有形成统一的标准。

对于表面形貌二维参数的评定,国际上已有 ISO12085-1996 和 ISO4287-1997 这两个成熟的评定标准;而我国目前主要还是采用旧标准 GB/T3505-1983,不过在 GB/T3505-2000 中已等效引用了 ISO4287-1997 中的新定义^[3-4],对评定参数的定义更加合理。这对我国相关产品质量的提高、工业化的发展有着重要的意义,同时产品标准的统一化有助于促进国际贸易的全球化。但此标准尚未得到推广和普及。

目前,表面三维粗糙度的评定仍处于探究阶段,还没有正式的国际标准,所以其研究成为学术热点^[5]。在新的 ISO4287 草案中,对于未滤波的基本轮廓、波度轮廓和粗糙度轮廓的描述,建议了 27 个标准化的幅度参数,以及 3 个间距和 12 个综合参数,其中 9 个参数与表面的比率曲线相关^[6-8]。这些参数中,一些是根据表面轮廓的描述推导出的,其余的则是为描述表面形貌特征而专门设计的。零件表面三维轮廓是复杂的,所以每个参数仅能描述表面三维轮廓的一个方面^[9]。

本文利用白光相移干涉系统测量标准样块的表面三维轮廓,通过相应的数据处理提取出粗糙度信息,计算出一系列相关评定参数。然后将这些参数与表面形貌分布相结合,从实际出发分析

各参数变化对表面形貌的影响,从而得出样块的形貌特征。最后与轮廓仪的测量结果进行比对,结果表明所提出的测量系统对表面粗糙度的评定效果更好。

2 三维形貌的评定参数及评定方法

在实际工程项目中,使用二维参数进行粗糙度评定,过多考虑了高度上的信息,而忽视了水平方向上的信息^[10],因此仅能粗略地反映出三面形貌的部分信息,这样对不同表面形貌的特征识别存在一定的难度,甚至两个完全不同的表面,计算出来的二维评定参数却是一样的,从而具有很大的误差。

表面三维形貌参数则能更加形象准确地表征工件的表面形貌特征^[11]。根据二维参数的定义方法引申出三维参数,由单重积分扩展到二重积分,充分地利用了垂直与水平方向上的形貌信息。限于篇幅,同时避免参数过于繁杂,本文仅对最主要的幅度参数和综合参数进行了评价。

2.1 幅度参数

2.1.1 表面形貌的均方根偏差 S_q

S_q 用于衡量工件表面分布与基准平面的偏离程度。

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}, \quad (1)$$

2.1.2 表面十点高度 S_z

令 η_{pi} 为被测表面内最高峰值, η_{vi} 为最低谷值,那么有:

$$S_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |\eta_{pi}| - \sum_{i=1}^5 |\eta_{vi}| \right]. \quad (2)$$

2.1.3 表面高度分布的偏斜度 S_{sk}

$$S_{sk} \approx \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j). \quad (3)$$

若 $S_{sk} = 0$, 则表面高峰、低谷对称分布;若 $S_{sk} < 0$, 则表面高度分布更倾向于低于基准面的一边;若 $S_{sk} > 0$ 则相反。

2.1.4 表面高度分布的陡度 S_{ku}

$$S_{ku} \approx \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j). \quad (4)$$

若 $S_{ku} > 3$, 则表面高度集中分布在中心; 若 $S_{ku} < 3$, 则表面高度分散分布。

2.2 综合参数

2.2.1 表面均方根斜率 $S_{\Delta q}$

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{j=2}^N \sum_{i=2}^M \rho_{ij}^2}, \quad (5)$$

式中 ρ_{ij} 表示表面斜率。

2.2.2 表面峰曲率算数平均值 S_x

S_x 为被测表面内峰的主曲率平均值。

$$S_x = \frac{-1}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\eta(x_{p+1}, y_q) - \eta(x_{p-1}, y_q) - 2\eta(x_p, y_q)}{\Delta x^2} + \frac{\eta(x_p, y_{q+1}) - \eta(x_p, y_{q-1}) - 2\eta(x_p, y_q)}{\Delta y^2} \right). \quad (6)$$

3 表面三维形貌测量系统及实验过程简述

3.1 表面三维形貌测量系统组成

基于白光相移干涉的表面三维形貌测量系统如图 1 所示。用白光相移干涉系统测量标准样块。计算机控制补偿型压电陶瓷驱动电源控制压电陶瓷带动其上固定的参考镜进行线性位移, CCD 采集由参考镜和被测工件反射光产生的干涉条纹, 送至计算机将工件表面各个像素点的轮廓包络线解调出来。然后, 利用二次曲线拟合法计算表面轮廓各点的相对高度, 经过图像处理得到工件表面的三维轮廓, 在滤除奇点和消除噪声干扰后, 再根据用高斯滤波器建立的基准面, 得到表面的粗糙度数据。根据对粗糙度测量数据分析, 计算出各评定参数, 并给出被测表面形貌的合理性分析。

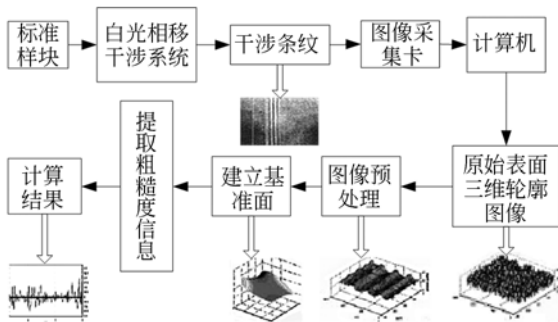


图 1 基于白光相移干涉的表面三维形貌测量系统

Fig. 1 Measuring system of 3D surface profile based on white light phase shifting interferometry

3.2 表面轮廓的基准面建立

根据高斯中线的建立方法可以引申出表面三维粗糙度的高斯评定基准面建立方法。将一维高斯滤波器的权函数扩展到二维, 就构成了表面三维形貌测量中的二维高斯滤波器权函数^[12], 如式 (7) 所示:

$$h(x, y) = \frac{\exp\left\{-\frac{\pi}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_y}\right)^2 \right]\right\}}{\beta \lambda_x \lambda_y}. \quad (7)$$

幅度传输特性为:

$$H(\lambda_x, \lambda_y) = \exp\left\{-\pi\beta \left[\left(\frac{\lambda_x}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_y}{\lambda_y}\right)^2 \right]\right\} = H(\lambda_x) \cdot H(\lambda_y), \quad (8)$$

其中 λ_x, λ_y 分别为 X, Y 方向的截止波长。二维高斯滤波器的幅度传输特性如图 2 所示。

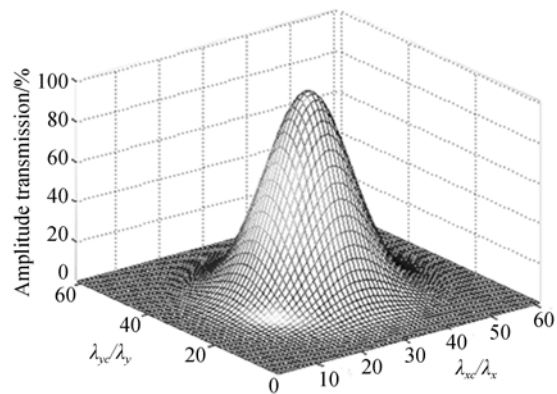


图 2 二维高斯滤波器的幅度传输特性

Fig. 2 Amplitude transmission characteristics of two-dimensional Gaussian filter

若设 $f(x, y)$ 是物体表面的原始轮廓信息, $\omega(x, y)$ 为表面三维形貌的粗糙度高斯评定基准面, 则有:

$$\omega(x, y) = f(x, y) * h(x, y). \quad (9)$$

由式(8)可以看出, 二维高斯滤波器具有分离特性, 在对原始轮廓进行滤波时, 可以不考虑 y 轴方向, 先在 x 轴方向进行一维滤波; 同理, 再在 y 轴方向进行一维滤波, 经过两次一维滤波后得到评定基准面。

由于其频率响应并不满足因果系统的充要条件, 因此高斯滤波器为非因果系统, 在物理上难以实现。考虑到滤波时的数据处理速度以及逼近程度, 这里采用高斯 B 样条逼近滤波器来逼近高斯滤波器。

3.3 仿真实验

根据以上讨论的表面轮廓基准面的建立过程,用 MATLAB 软件编程进行仿真实验,来验证高斯 B 样条滤波器的滤波效果。首先给出一个正弦曲面作为理想表面,再在理想表面上加随机噪声,此随机噪声就是表面理想的粗糙度信息,加随机噪声后形成的曲面作为待测量的原始表面三维轮廓,即输入图像 $f(x, y)$,与滤波器权函数在频率域进行乘法运算,得到表面三维轮廓的基准面 $\omega(x, y)$,原始表面的三维轮廓如图 3 所示,得到的基准面如图 4 所示,最终提取出的粗糙度信息如图 5 所示。

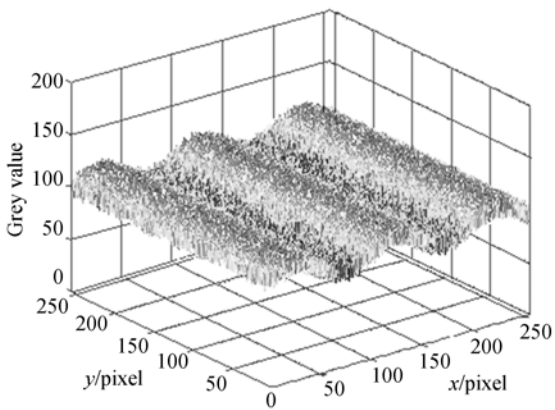


图 3 原始表面轮廓

Fig. 3 Original surface profile

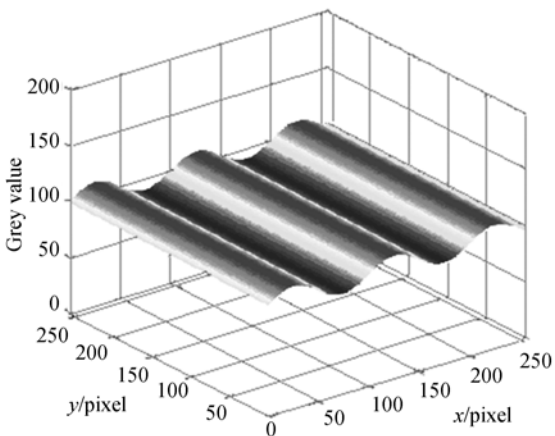


图 4 基准面

Fig. 4 Datum plane

取图 4 中的部分数据进行误差分析,发现得到的基准面与理想表面之间的误差不超过 0.5%,说明此滤波器的滤波效果良好。

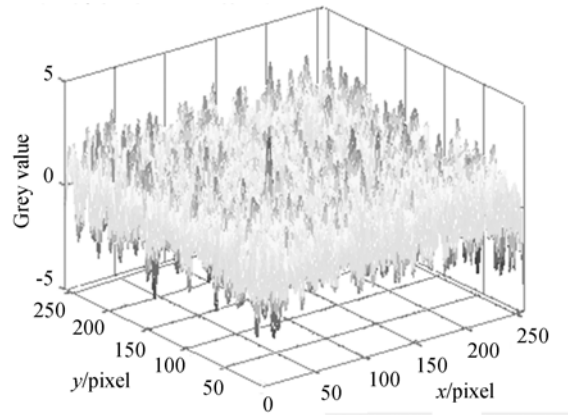


图 5 粗糙度表面

Fig. 5 Roughness surface

4 测量实验与结果分析

用轮廓仪标定 4 种不同加工方式加工出来的标准样板,然后用白光相移干涉测量系统进行测量,经处理后得到的测量数据如表 1 所示。

表 1 标准样板的测量结果

Tab. 1 Measuring result of standard samples

	标定值/ μm	测量值/ μm	绝对误差/ μm	相对误差/%
平磨	0.412	0.406	0.006	1.5
刨	0.794	0.783	0.011	1.4
端铣	0.804	0.781	0.023	2.8
平铣	0.857	0.833	0.024	2.4

从表 2 可以看出,这 4 个标准样板中端铣的方法加工的样板误差最大为 2.8%,测量结果表明该系统在粗糙度测量方面的测量精度较高。

选择粗糙度为 $0.05 \mu\text{m}$ 的标准研磨样块进行测量,得到的表面三维轮廓如图 6 所示,计算得到的评定参数如表 2 所示。

表 2 评定参数的计算结果

Tab. 2 Calculation results of evaluation parameters

	(μm)			
参数	R_a	S_q	S_c	S_k
样块标称值计算值	0.05	0.052	0.059	0.123
参数	S_{ku}	$S_{\Delta q}$	S_w	
样块标称值计算值	1.256	2.993	0.181	

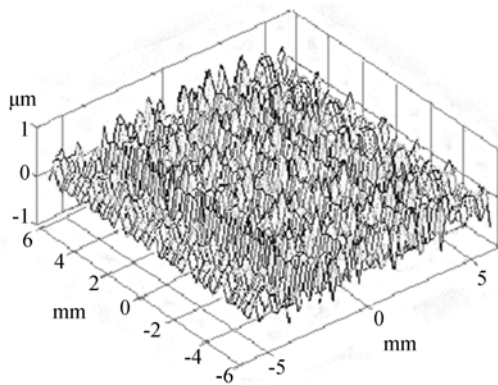


图 6 研磨标准样块的表面三维轮廓

Fig. 6 Surface 3D profile of standard grinding sample

根据表 2 计算出的表面三维评定参数得到 $S_q = 0.052 \mu\text{m}$, 反映出表面轮廓偏离基准平面的程度并不大。均方根偏差与粗糙度比值 $S_q/R_a = 1.04$, 接近于 1, 反映出该被测表面相对平缓, 没有特突兀的波峰或波谷。表面十点高度 $S_z = 0.059 \mu\text{m}$, 反映出该被测表面高度的峰值变化范围较小。偏斜度 S_{sk} 大于 0, 反映出该被测表面的轮廓高度较多地分布在高于中面的那一面。陡度 S_{ku} 小于 3, 反映出该被测表面的轮廓高度分布相对均匀, 这符合研磨样板表面轮廓的分布特征。均方根斜率 $S_{\Delta q} = 2.993 \mu\text{m}$, 反映出该被测表面

轮廓的斜率相对较大。采集到的表面信号中高频成分较多, 表明表面结构较为精细。表面峰曲率算数平均值 $S_{sc} = 0.181 \mu\text{m}$, 反映该被测表面轮廓的峰点曲率不是很大。

上述分析表明, 被测标准研磨样块的总体轮廓较为平缓, 表面较大的尖峰出现在基准面之下, 峰值变化的总体范围较窄, 峰值变化范围内峰值分布均匀, 表面轮廓斜率较大, 但尖峰处曲率并不大。

5 结 论

本文采用 4 种不同加工方式加工的样板验证测量系统的精度, 接着用白光干涉相移系统测量标准研磨样块表面的微观轮廓数据, 并结合实验数据计算一系列参数, 然后分析了各参数反映的零件表面形貌的状况。实验结果表明, 均方根偏差与粗糙度比值为 1.04, 表面十点高度为 $0.059 \mu\text{m}$, 偏斜度大于 0, 陡度小于 3, 均方根斜率为 $2.993 \mu\text{m}$, 表面峰曲率的算数平均值为 $0.181 \mu\text{m}$ 。这些参数可以更加形象地描述工件表面结构、谷的分布以及谷的可连接性等特征。由粗糙度评定结果可知, 本实验的测量结果与轮廓仪的测量结果相符。

参考文献:

- [1] 邹文栋, 黄长辉, 郑瑜. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1612-1619.
ZOU W D, HUANG C H, ZHENG Q. Detect the microscopic 3D morphology of alloy dimple fracture by scanning white light interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (7):1612-1619. (in Chinese)
- [2] 高琦. 基于小波变换的金刚石砂轮表面形貌三维评定参数的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2014.
GAO Q. *Research on Three Dimensional Evaluation Parameters of Surface Topography of Diamond Grinding Wheel Based on Wavelet Transform* [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [3] 李满昌, 程庆柱, 李东. 表面粗糙度新旧国家标准差异的分析[J]. 林业机械与木工设备, 2005, 33(7): 44-46.
LI M CH, CHENG Q ZH, LI D. Analysis of the differences between the old and new national standard of surface roughness[J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2005, 33 (7): 44-46. (in Chinese)
- [4] 商钰. 腐蚀环境对钢结构表面锈蚀特征影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
SHANG Y. *Study on the Corrosive Environment Influences on the Characteristics of the Steel-structure Surface* [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] 李伯奎, 李年莲, 刘远伟, 等. 表面粗糙度功能参数及其三维量值的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2011(9):179-181.
LI B K, LI N L, LIU Y W, et al.. Experimental study of surface roughness function parameters and its three dimension values [J]. *Journal of Mechanical Design and Manufacturing*, 2011 (9): 179-

181. (in Chinese)
- [6] 李成贵,董申. 三维表面微观形貌的表征趋势[J]. 中国机械工程,2000,11(5):488-492.
LI CH G, DONG SH. The trends of three-dimensional surface micro topography characterization[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11 (5) : 488-492. (in Chinese)
- [7] EGAN P, LAKESTANI F, WHELAN M P. Novel techniques for random depth access 3D white-light optical metrology[J]. *Interferometry XIII: Techniques and Analysis*, 2006 (8):212-213.
- [8] 陈志杰. 微细电火花加工表面粗糙度评定研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
CHEN ZH J. *Research on Roughness Evaluation of the Micro Electrical Discharge Machining Surface* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [9] 林滨,黄新雁,魏莹,等. 加工表面形貌测量理论、方法及评价[J]. 制造业自动化,2006,28(8):14-18.
LIN B, HUANG X Y, WEI Y, *et al.*. Measurement theory, method and evaluation of machined surface topography[J]. *Journal of Manufacturing Automation*, 2006, 28 (8) : 14-18. (in Chinese)
- [10] 杨练根,何浪,王选择,等. 波长轮换与相移扫描相结合的表面形貌测量系统[J]. 光学精密工程,2015,23(9):2466-2472.
YANG L G, HE L, WANG X Z, *et al.*. Surface topography measurement system based on wavelength rotation and phase shift scanning [J]. *Opt. Precision Eng*, 2015, 23(9):2466-2472. (in Chinese)
- [11] 杨本杰. 塑性变形界面表面形貌变化及摩擦特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
YANG B J. *Study on Surface Topography Changes and Friction Characteristics of Plastic Deformation Interface* [D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] 许景波,袁怡宝,刘泊. B样条滤波器建立表面轮廓中线的方法[J]. 光学精密工程,2008,16(8):1411-1415.
XU J B, YUAN Y B, LIU B. Method for establishing surface profile center line by B spline filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (8) : 1411-1415. (in Chinese)

作者简介:



刘泊(1961—),男,黑龙江巴彦人,教授,硕士生导师,1982年于天津大学获得学士学位,1989年、2013年于哈尔滨理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电检测技术、表面三维形貌测量方面的研究。E-mail: lb0303@263.net



齐兴华(1992—),女,黑龙江密山人,硕士研究生,2014年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事图像处理、表面三维形貌测量方面的研究。E-mail: 1303981267@qq.com