

光学轮廓仪对光学元件表面 空间波长回应的研究

徐德衍 沈卫星 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 在分析光学轮廓仪的空间分辨率和带限功率谱密度函数的基础上, 用所测不同样品的大量数据研究了光学元件表面粗糙度测量与光学轮廓仪对表面空间波长的带限回应关系。对由光学轮廓仪不同带宽限制内测量元件表面粗糙度有不同回应所引起不同偏差的解决办法提出了几点建议。

关键词 表面空间波长, 光学轮廓仪, 带限回应。

1 引 言

光学轮廓仪由于其特有的优越性, 广泛应用于光学元件表面粗糙度测量中。商业的光学轮廓仪有 Zygo Maxim · 3D、New View 100、Wyko Topo 3D 等^[1], 每台仪器都可使用几种不同物镜。在测试实践中, 使人们感到困惑的是, 不同仪器或同一仪器配上不同物镜测量同一元件表面获得的表面粗糙度值常常不一致, 这使元件表面粗糙度的评定、表征及加工要求难以统一。所以, 规范表面粗糙度的测量是十分迫切的。

光学元件表面轮廓起伏可看作无数不同振幅和不同频率正弦波的叠加, 元件表面轮廓起伏分布可转换为元件表面空间波长的分布来表示。不同仪器和不同物镜构造组成的测试光学系统空间分辨率各不相同, 其对元件表面的空间波长回应也应不同。本文使用 Zygo Maxim · 3D 5700 光学轮廓仪 2.5×、20×、40× Mirau 物镜分别实测了几类光学元件表面粗糙度, 分析了各个元件表面的空间波长分布, 并讨论了各个物镜对元件表面空间波长的不同回应。在此基础上, 提出了因仪器回应引起不同结果的解决办法和相关建议。

2 基本原理分析

2.1 表面粗糙度与表面空间波长

表面粗糙度是指表面微观起伏不平度, 它通过高(深)度尺寸和横向尺寸来表征。高度尺寸表征体现在均方根误差 RMS、峰谷值 PV 及高度分布函数等。RMS、PV 的定义如下,

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Z(x, y)_i^2} \quad (1)$$

$$PV = \max [Z(x, y)] - \min [Z(x, y)] \quad (2)$$

式中 N 为数据点总数, $Z(x, y)$ 为表面轮廓高度分布, x 、 y 分别为横坐标与纵坐标。而横向尺寸就可用表面空间波长(频率)分布来表征。Bennett 根据表面空间波长 λ 将不同表面轮廓大致分为三种类型^[2]:

- 1) 表面粗糙度 $\lambda < 1$ 毫米
- 2) 表面波纹度 几毫米 $< \lambda < 1$ 厘米 同时体现表面横向尺寸和高度尺寸
- 3) 表面面形 几厘米 $< \lambda <$ 元件表面尺寸

特性的函数有功率谱密度函数等, 其离散估计的公式表示如下^[3]:

$$S_1(f_m) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^D \frac{2D}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(i2\pi mn/N) W(n) Z_j(n, 1) \right|^2 K(n) \quad (3)$$

式中 L 为平均频谱范围, N 为取样点数, $2D$ 为取样间隔, Z 为高度尺寸, $W(n)$ 为窗口函数, $K(n)$ 为边界因子, n 为 $0 \sim (N-1)$ 的整数。

2.2 仪器的空间分辨率和带限功率谱密度函数

仪器的空间分辨率受限于离散取样效应和仪器系统光学分辨率。离散取样效应有两个方面, 即取样区域大小和取样间隔大小, 其中取样间隔取决于探测器列阵像元到被测表面的投影^[3]。则仪器的传递函数 $P(f)$ 可表示为

$$P(f) = P(f)_1 P(f)_2 P(f)_3 \quad (4)$$

$P(f)_1$ 取决于取样区域大小, $P(f)_2$ 取决于取样间隔大小, $P(f)_3$ 取决于光学系统分辨率。

综合(3)式和(4)式可得

$$S_{\text{meas}}(f) = |P_3(f)|^2 \frac{1}{L} \sum_{j=1}^D \frac{2D}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp(i2\pi mn/N) W(n) Z_j(n, 1) \right|^2 K(n) + N'(f) \quad (5)$$

式中 $P_3(f)$ 只对高频截止, 其截止频率为 f_0 。从(5)式可知 $S_{\text{meas}}(f)$ 的频谱范围在 $1/ND < f < \min(1/2D, f_0)$ 之间, 则 $S_{\text{meas}}(f)$ 的表面空间波长范围应为 $\max(2D, 1/f_0) < \lambda < ND$ (ND 是取样区域尺寸), 这即是光学轮廓仪的带限回应范围。Zygo Maxim • 3D 5700 光学轮廓仪中所有 Mirau 物镜 $2D$ 值均大于 $1/f_0$, 所以其回应带限范围为 $2D \sim ND$ 。

3 实测数据分析

3.1 不同物镜测量钹玻璃片同一位置

实验分别使用 $2.5\times$ 、 $20\times$ 、 $40\times$ Mirau 物镜测量钹玻璃片等四类光学元件的同一位置, 测试数据见图 1。三个物镜的测试表面空间范围分别为 $(3.63 \sim 14.80) \mu\text{m}$ 、 $(0.48 \sim 1.85) \mu\text{m}$ 、 $(0.24 \sim 0.93) \mu\text{m}$ 。

从图 1 可很明显地看出, 三个物镜测量钹玻璃片 1 与光盘片得到的 PV、RMS 值较一致, 而钹玻璃片 2 与 K_9 玻璃片的值有较大差异。

钹玻璃片 1 与光盘片虽粗糙程度不一致, 但取样表面无大的起伏, 呈各向同性的随机分布, 所以由不同带限内三个物镜的回应统计的表面粗糙度值基本相同。

钹玻璃片 2 在取样表面内有峰谷间隔约在 $0.2 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ 左右的起伏, $20\times$ 物镜回应出了大于 0.2 mm 间隔的起伏, 同时回应出了小于 0.02 mm 间隔的细划痕, 这使其获得的 PV 和 RMS 值较大; 而 $40\times$ 物镜不能回应间隔大于 0.23 mm 的起伏, 且由于其取样区域小

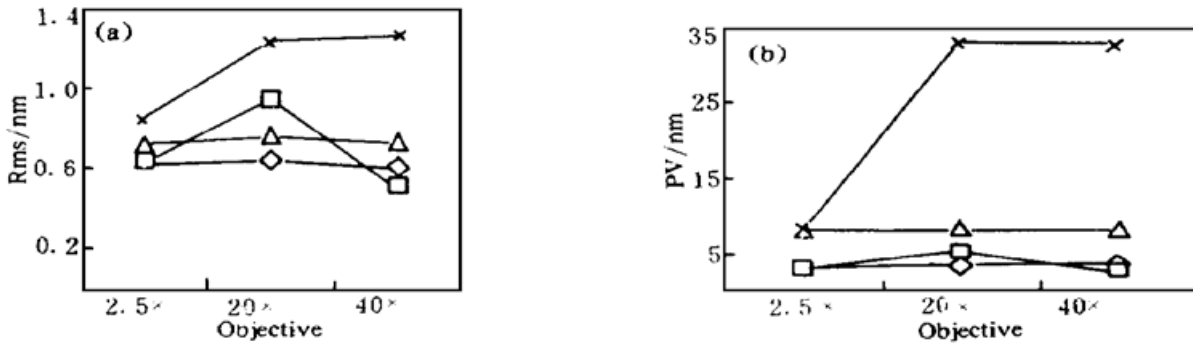


Fig. 1 Surface roughness result of various kinds of optics component measured by 2.5 \times 、20 \times 、40 \times objective. (a) RMS result of surface roughness measured, (b) PV result of surface roughness measured. \diamond : $\phi 100$ Nd glass slab 1, \square : $\phi 100$ Nd glass slab 2, \triangle : $\phi 150$ optical disk substrate, \times : $\phi 100$ K₉ glass flat

于 20 \times 物镜而让开了上述细划痕,是使测得的 PV 和 RMS 值较小的主要原因;对 2.5 \times 物镜来说,上述细划痕虽在取样区域内,却不能分辨,也使统计出的表面粗糙度值较 20 \times 物镜小。

K₉玻璃在三个物镜取样区域内都有一宽 10 μm 左右、深大于 30 nm 的划痕,但 2.5 \times 物镜不能回应,使其统计表面粗糙度值较小。

由上可知, PV、RMS 值不同除了不同物镜取样区域位置略微错开的影响外,主要是由仪器对表面空间波长的带限回应引起的,即取样区域尺寸、取样间隔及光学系统三个方面的限制。而不同物镜测试钕玻璃片 1 与光盘片的数据较一致,是表面轮廓起伏在三个物镜可回应的各个表面空间波段中充分随机分布的缘故。

光学轮廓仪可回应的带限波段各不相同,从而引起测得的表面粗糙度数据的差异,本文称这是光学轮廓仪对表面起伏的带限回应效应。由于带限回应效应的存在,对应表面回应的空间波长范围内各波段振幅综合影响不同, PV、RMS 值有差异也就并不奇怪。在使用 Maxim 3D 5700 轮廓仪的测试实践中,由于大部分光滑光学元件在光学轮廓仪的分辨率下呈现各向同性的随机分布,各个物镜测得的数据出现较小差异的概率较大,而不够光滑的元件表面粗糙度数据在不同物镜测量时差异较大。

3.2 不同物镜对光栅表面回应的考查

为了进一步考察物镜的回应,实验分别使用 2.5 \times 、20 \times 、40 \times Mirau 物镜测试了光栅 1 和光栅 2。各个物镜回应的一维表面轮廓及其功率谱密度(PSD)函数见图 2 和图 3,明显可以看出各个物镜对两光栅回应不同,40 \times Mirau 物镜回应不出光栅 1 的形状[图 2(c)],2.5 \times Mirau 物镜回应光栅 2 的轮廓断断续续[图 3(a)]。

各个物镜对光栅的不同回应,充分说明了光学轮廓仪带限回应的客观存在。对类似光栅的表面,事先能估计出它的分布,即能选择合适的光学系统去测量其表面轮廓;对一般随机表面,事先很难估计它的表面分布。事实上大部分元件的表面空间波长在全波段内分布,只不过起伏程度各不相同,而各个物镜回应了它们各自的波段。

4 解决办法与建议

4.1 初步讨论:表面粗糙度标准的不完善

既然表面粗糙度测量数据受被测元件的表面空间波长分布和仪器空间分辨率两个方面的

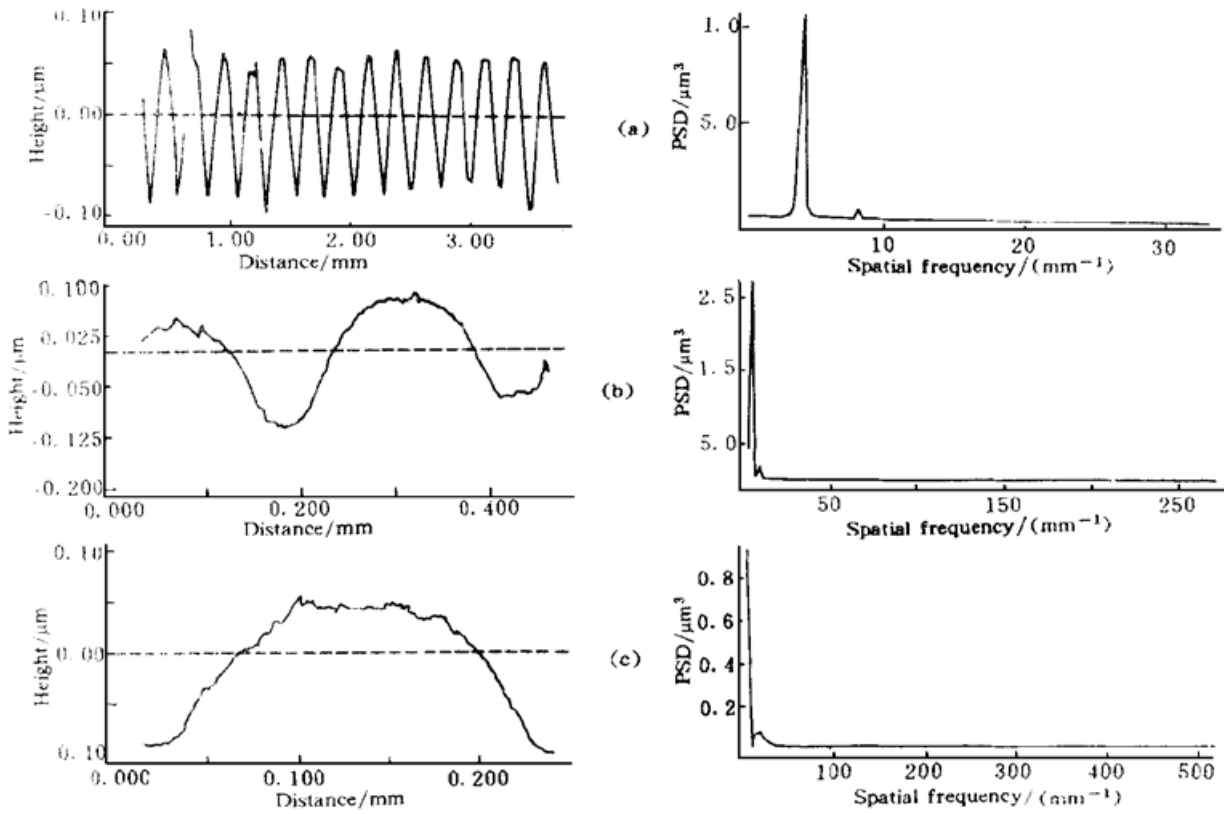


Fig. 2 The surface profile of the grating 1 measured by various objective. (a) Responed by 2.5× Mirrau objective, (b) Responed by 20×Mirrau objective, (c) Responed by 40×Mirrau objective

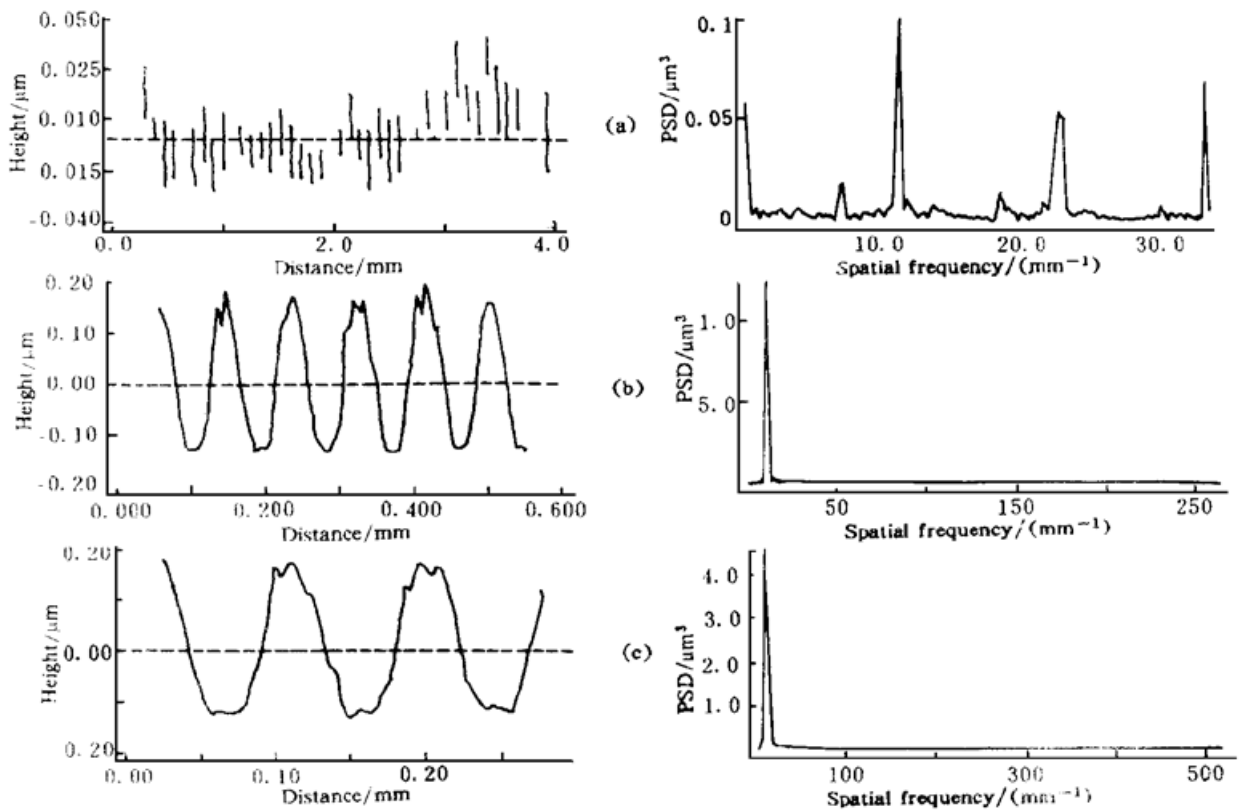


Fig. 3 The surface profile of the grating 2 measured by various objective. (a) Responed by 2.5× Mirrau objective, (b) Responed by 20×Mirrau objective, (c) Responed by 40×Mirrau objective

影响,那么如何选定合适的表面空间波段是使表面粗糙度测量标准化的重要问题之一。

我国表面粗糙度标准 GB/T 1031^[4]是针对机械表面的,并没有涉及光学元件表面粗糙度测量的相关规定,其列出的最小标准 Ra 值远大于如今光学元件已达到的“0.1 nm”级水平。希望经过国内光学测试人员的努力,在 X 光镜面及其超光滑元件的需求量日益增加的今天有针对低散射光学元件的表面粗糙度标准出台。

4.2 建议之一:选择合适的物镜

一般光滑的抛光光学元件的起伏主要受 $0.5\ \mu\text{m}\sim 2\ \mu\text{m}$ 左右抛光粉颗粒直径的影响,接近此空间波长分辨率的 $20\times$ 物镜最适合测量关心抛光程度的元件。

对于金刚石车削元件,一般的车刀尖直径在 $10\ \mu\text{m}$ 上下,同样直径的车刀尖形成的轮廓起伏比磨粒大得多,使用 $10\times$ 、 $20\times$ 物镜测量都能完全回应车削引起的起伏。

对于横向尺寸在“纳米”量级的精细结构的测量,已超出了光学轮廓仪的分辨率,使用类似电子隧道显微镜的仪器较适合。

由于大部分光学元件表面分布是充分随机的各向同性分布,不同空间波长范围内产生的 RMS 值差异不大,而且绝大部分光学元件在使用时没有对表面粗糙度的空间波长范围作具体的限制; $2.5\times$ 物镜适合于较长空间波长范围的表面粗糙度测量,足以应用于大部分光学元件,这有利于统一加工光学元件的验收标准。

对于有特殊使用要求的元件,建议在使用要求感兴趣的波段内测量表面粗糙度数据较合适,并在提供数据的同时说明测量的空间波段范围。

4.3 建议之二:建立标准块库

建议建立国内的标准块库,标准块分为标准平板(Precision Reference Flat)与标准步高块(Step Height Standard)^[4],这些标准平板口径一般控制在 $\phi 30\ \text{mm}$ 以内,在其中心 $\phi 25\ \text{mm}$ 内任何 $10\ \text{mm}$ 区域保证表面粗糙度 $\text{RMS}\leq 0.2\ \text{nm}$;同样标准步高块以不同高度分几档,每一档分别做成坡形步高和垂直步高,以便适用于不同机械轮廓仪和光学轮廓仪标定。由国外引进的标准块及以此标准块制作的副标准块来建立国内的标准块库。

4.4 建议之三:对表面粗糙度的表征的建议

目前国内表面粗糙度测试中一般只提供反映表面粗糙度的高度尺寸的 PV、RMS 和 Ra 等值,没有提供体现与仪器的带限回应的有关参数如取样区域尺寸、取样间隔等值。建议表面粗糙度表征以多少表面空间波长范围内的 RMS 值(各取样区 RMS 的平均值)的形式来表示,以便全面反映元件表面粗糙度状况。

4.5 建议之四:将表面粗糙度按测量对象分类

在表面粗糙度测量中主要有三类对象:一类是机械表面,一类是普通光学元件表面,另外是针对元件表面的精细结构。各对象有各自的表面空间波长范围,不妨按测试对象不同将表面粗糙度分为三类(表 1),使各类型表面粗糙度测量与表征不至于混淆。

Table 1. Surface roughness classification

	class object	spatial wavelength (λ) scope
I class	fine surface fluctuation	$1\ \text{nm} < \lambda < 1\ \mu\text{m}$
II class	optics component surface	$1\ \mu\text{m} < \lambda < 4\ \text{mm}$
III class	mechanism component surface	$0.08\ \text{mm} < \lambda < 5\ \text{mm}$

I类表面粗糙度测量适合于对真空镀膜引入的微起伏的观察及其它小于微米量级的空间波长范围内感兴趣的起伏的情况; II类的空间波长范围适合于抛光过程引入的光学元件表面粗糙起伏的测量, 且是用于测量光学元件的光学轮廓仪和精密触针式仪器的测试范围; III类空间波长范围是根据我国国家标准^[5]规定的范围确定, 机械元件表面一般都由触针式轮廓仪测量。

结 论 由于光学轮廓仪带限回应效应的存在, 元件表面空间波长分布各有特征, 使在不同带限内测量的表面粗糙度数据存在差异。目前最重要的是合理评价光学元件表面粗糙度指标规范的出台, 本文建议以II类表面粗糙度来测量和表征抛光和金刚石车削光学元件表面。

参 考 文 献

- [1] 徐德衍, 林尊琪, 光学表面粗糙度研究的进展与方向 I. 光学仪器, 1996, **18**(1) : 32~ 37
徐德衍, 林尊琪, 光学表面粗糙度研究的进展与方向 II. 光学仪器, 1996, **18**(2) : 35~ 40
- [2] Jean M. Bennett, Recent developments in surface roughness characterization. *Engng. Opt.*, 1993, **6**(1) : 1~ 9
- [3] E. L Church, P. E. Takacs, Instrumental effects in surface finish measurement. *Proc. SPIE*, 1988, **1009** : 46~ 55
- [4] P. E. Takacs, E. L. Church, A step-height standard for surface profiler calibration. *Proc. SPIE*, 1993, **1995** : 235~ 244
- [5] 中华人民共和国国家标准 GB/T 1031-95, 北京: 中国标准出版社, 1996. 1~ 3

Response of Optic Profiler to Spatial Wavelength of Optical Element Surface

Xu Deyan Shen Weixing Lin Zunqi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 10 September 1997; revised 9 December 1997)

Abstract The relation between roughness measuring of optical elements and the bandlimit response of the profiler used in the measuring is discussed. The analysis is based on a lot of data from the different samples. Some proposals are put forward for solving deviation induced by surface roughness measuring in different surface spatial wavelength scope using optic profiler.

Key words surface spatial wavelength, optic profiler, bandlimit response.