

光学元件表面微观轮廓和轮廓的特征*

向 阳

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘要 探讨了光学元件表面微观轮廓统计特征参数的基本性质、计算方法及其相互关系; 测试了大量各类光学系统、不同材料元件表面微观轮廓特征参数, 由此明确了常用光学元件表面微观轮廓特征和轮廓参数的量值范围及其特征。

关键词: 表面粗糙度; 表面微观轮廓特征参数

1 引 言

研究光学元件表面粗糙度的特征, 对进一步探讨粗糙度对像质的影响, 建立粗糙度公差理论, 都是至关重要的^[1]。G. Rasigni 和 M. Rasigni 等人^[2-3]先后研究了相关函数的计算和测试方法, 并采用高横向分辨率的显微密度法, 测定了 CaF_2 、 MgF_2 、 LiF 等抛光样品的表面微观轮廓, 指出: 1. 相关函数是高斯型的; 2. 由于 J. Eastman^[4]和 J. M. Bennett^[5]测量表面微观轮廓时采用的是低横向分辨率的干涉轮廓仪, 他们所得“相关函数为指数型”的结论是错误的, 而应为高斯型。L. Church^[6]讨论了各种表面微观轮廓特征参数的意义和表示方法, 以及测量仪器传递函数对测量值的影响。

G. Rasigni、M. Rasigni 等人的研究测试结果, 仅限于少量几种实验样品, 不能满足全面探讨粗糙度对像质影响和建立粗糙度公差理论的要求。因此, 我们首先研究和建立了高斯型分布下各种表面微观轮廓特征参数的性质和相互关系式, 以便确定表面微观轮廓的特征; 然后, 研究和测试了目前各类光学系统、不同材料光学元件表面的微观轮廓, 最后, 讨论了表面轮廓的一般特征。

2 表面微观轮廓特征参数的性质及基本关系

下面, 根据统计原理, 讨论和建立表面微观轮廓特征参数的基本性质, 及其在高斯分布下

* 收稿日期: 1996年10月7日

应用光学国家重点实验室基金资助课题的部分研究内容

的主要相互关系式。

如图1所示, 设 $S(x)$ 代表一表面微观轮廓曲线的高度函数值, $\langle S(x) \rangle$ 代表 $S(x)$ 的平均微观高度, 则轮廓曲线上任意点至平均高度线 $\langle S(x) \rangle$ 的距离

$$H(x) = S(x) - \langle S(x) \rangle \quad (1)$$

式(1)中的尖括号代表系综平均。由式(1), 粗糙度平均算术偏差 R_a 及标准偏差 σ 分别为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |H(x)| dx = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H(X_n)| \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha H^2(x) dx = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H^2(X_n) \quad (3)$$

式(1~3)中, l 为基本长度, N 为正整数, R_a 亦可由 $H(x)$ 的概率密度函数 $P(H)$ 求得^[7]

$$R_a = \int_0^\infty |H(x)| P(H) dH \quad (4)$$

当 $P(H)$ 为高斯分布时^[8]

$$P(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{H^2(x)}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

将式(5)代入(4)中, 得到

$$\sigma/R_a \sim 1.25 \quad (6)$$

式(6)表明, 当 $\sigma/R_a \sim 1.25$ 时, $H(x)$ 的 $P(H)$ 为高斯型。

当表面微观轮廓为各态历经、平稳且各向同性时, 其二次矩, 即自相关函数, 可用下面的一维函数来表示^[3]

$$C(x) = \langle H(x)H(x+x) \rangle - \langle H(x) \rangle \langle H(x+x) \rangle = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{a} \int_0^a H(x)H(x+x) dx \quad (7)$$

其中, a 为采样总长度, x 为微观轮廓曲线上另一点的横坐标。式(7)可以表写为^[9]

$$C(x) = \int_0^\infty H(x)H(x+x)P(H) dH \quad (8)$$

$H(x)$ 和 $H(x+x)$ 可视作滤波器, $P(H)$ 视作样本函数, 则当 $P(H)$ 为高斯分布时, $C(x)$ 分布的初始部分可表定为^[3]

$$C(x) = \sigma^2 e^{-\frac{x^2}{l_c^2}} \quad (9)$$

其中 l_c 为相关长度。由式(9), 当 $x=0$ 和 $x=l_c$ 时, 分别有

$$\sqrt{C(0)} = \sigma \quad (10)$$

$$C(l_c) = \frac{\sigma^2}{e} \quad (11)$$

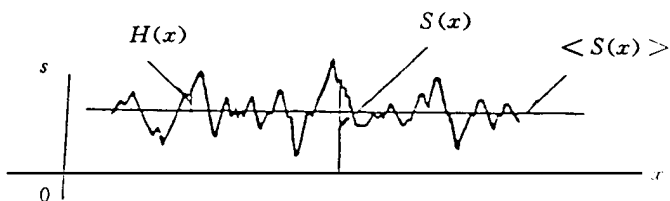


Fig 1 Graphic expression of surface microprofile parameters

式(9- 11)表明,当 $C(x)$ 随 x 的变化图形已知时,可由该图形求得 $H(x)$ 的 σ 和 $C(x)$ 的 l_c ,如图2所示。

由式(9- 11)和图2可知: l_c 是表示微观轮廓横向特征的一种参数。 l_c 增加,则意味着表面微观轮廓变化缓慢,即表面平均波长增加。

表面微观轮廓斜率均方差 Δq 的表示式^[6]为

$$\Delta q^2 = \lim_a \frac{1}{a} \frac{a/2}{a - a/2} \left(\frac{dS(x)}{dx} \right) dx$$

$$= - \frac{d^2C(x)}{dx^2} \Big|_{x=0} \quad (12)$$

当 $C(x)$ 为高斯型时,由式(9)和(12)得

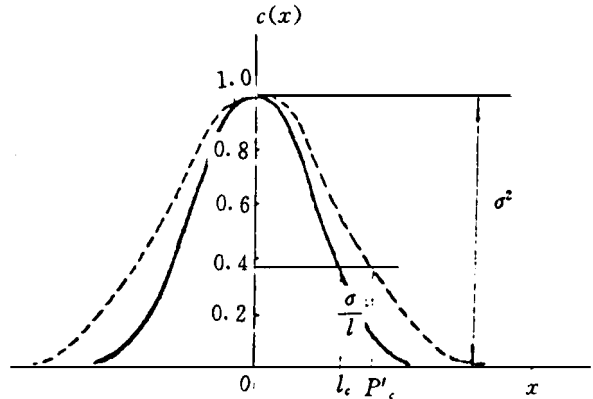


Fig 2 Guassian autocorrection functions The full and dashed lines represent correlation functions with different correlation-length

$$\Delta q^2 = \frac{2\sigma^2}{l_c^2} \quad (13)$$

式(13)与 T F Gesell 的实验结果^[10]相一致。 E L. Church 指出: 当 $S(x)$ 的分布为高斯型时,其平均表面波长 $l(a)$ 与 $\alpha \Delta q$ 有下述关系^[6]

$$l(a) = 2\pi\sigma/\Delta q \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)中,得到

$$l(a) = 4.4 l_c \quad (15)$$

以上论述表明: 当 $C(x)$ 或 $S(x)$ 的分布为高斯型时, $l(a)$ 为 l_c 的 4.4 倍。

式(1~ 15) 提供了各种表面微观轮廓特征参数的计算公式和相互关系式,从其中某些关系式可判断 $S(x)$ 或 $C(x)$ 是否是高斯型,是下面分析表面微观轮廓特征的理论基础。

3 光学元件表面微观轮廓的特征

我们采用 From Talysurf 表面轮廓仪(横向分辨率 $0.5 \mu\text{m}$ 、高度灵敏度 1mm 、采样间距 $0.4 \mu\text{m}$)和 WYKO 干涉显微镜(横向分辨率 $0.5 \mu\text{m}$ 、高度灵敏度 0.5nm)测定了国产显微物镜、照相物镜及其他常用镜头中各种玻璃号的光学元件表面微观轮廓。其中部分表面的微观轮廓曲线如图3所示。

根据式(1~ 3)和(7),参照[2]的计算方法,计算了和 $C(x)$ 和 R_a 及 σ ,在此基础上,计算 σ/R_a 值,确定 $C(x)$ 暨 $P(H)$ 的类型,根据算得的 $C(x)$,由式(11)、式(13)和式(15),确定 l_c 、 Δq 和 $l(a)$ 等的值,所得部分结果列在表1和图4中。

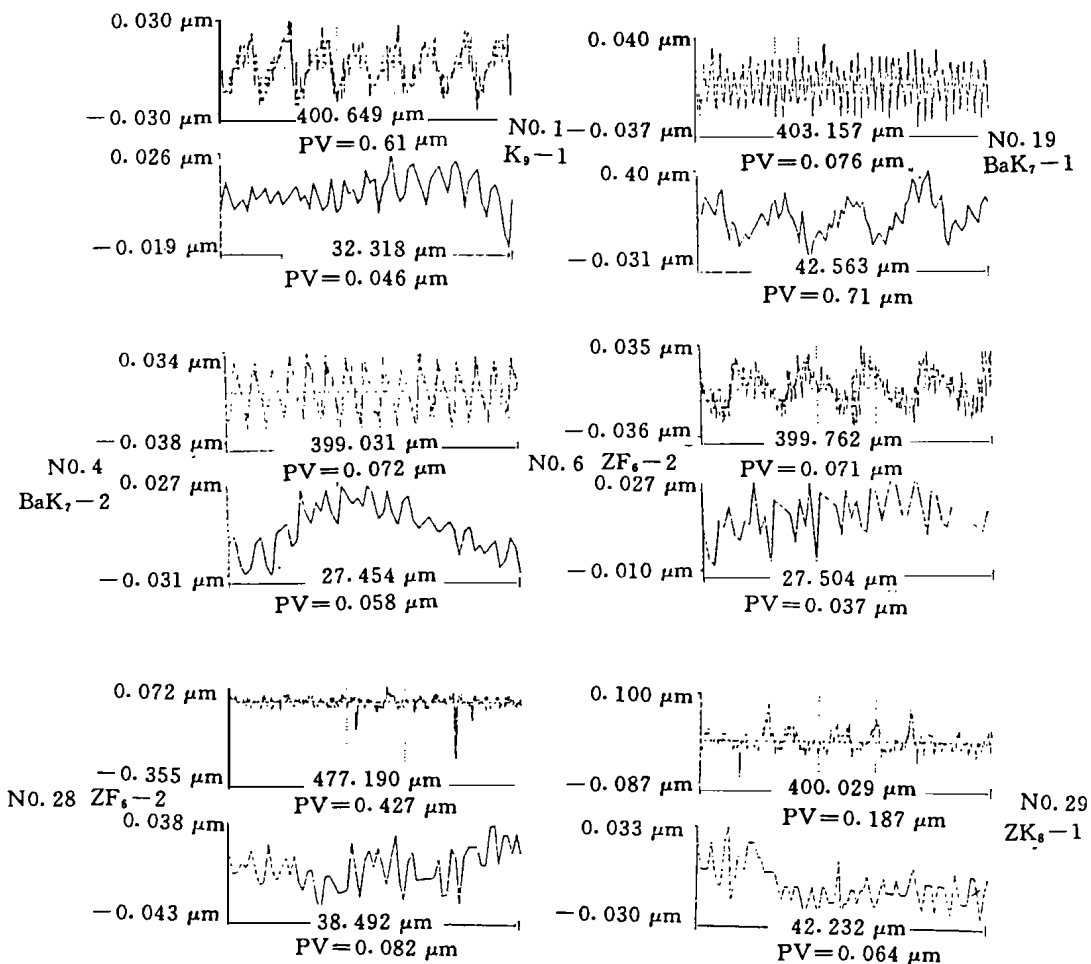


Fig 3 Microprofile tested by the Fom Talysurf Profilometer for the polished surfaces of K₇, BaK₇, ZF₆ and ZK₈. The lower's are the local magnified diagrams corresponding to their upper's

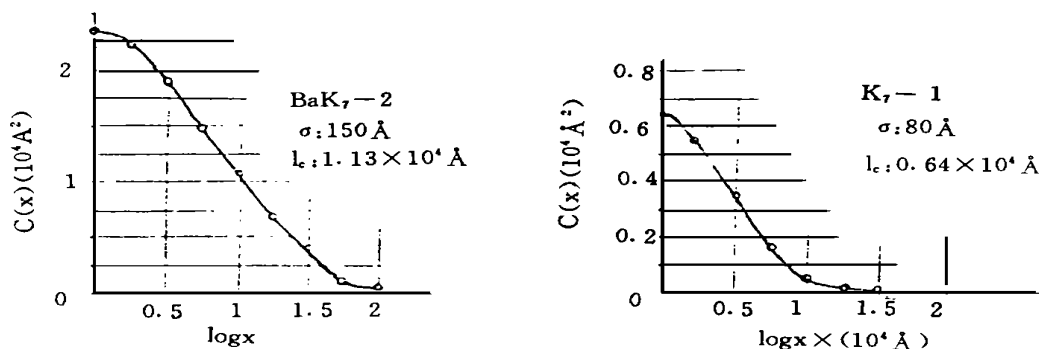


Fig 4 The initial portion of correlation functions for some polished optical glass microprofiles σ : RMS of roughness, L_c : correlation length

**Table 1 Characteristic parameters for optical element surfaces
(including surfaces deposited with an antireflective film).**

No.	glass type	form	PV (nm)	R_a (nm)	σ (nm)	Δq (°)	$l(a)$ (μm)	l_c (nm)	σ/R_a	type of covariance function
1	K ₉	pane	49	6	8	1.04	2.768	629	1.33	Gaussian
2	BaK ₇	pane	87	8	11	1.64	2.433	533	1.38	Gaussian
3	ZF ₆	pane	68	8	10	1.29	4.894	648	1.25	Gaussian
4	K ₇	pane	83	9	11	1.39	2.884	656	1.22	Gaussian
5	K ₉	convex	70	11	14	1.27	3.824	869	1.27	Gaussian
6	BaK ₇	convex	76	12	14	1.26	3.978	904	1.17	Gaussian
7	ZF ₆	convex	144	17	21	1.75	4.372	994	1.24	Gaussian
7	K ₇	convex	50	7	8	1.09	2.779	632	1.14	Gaussian
9	ZK ₈	convex	187	14	19	1.40	4.776	1086	1.36	Non Gaussian
deposited with antireflected thin film										
10	K ₉	convex	63	9	11	0.33	11.720	2664	1.22	Gaussian
11	BaK ₇	convex	67	8	10	0.17	21.954	4900	1.25	Gaussian
12	ZF ₆	convex	48	7	9	0.04	78.780	17905	1.29	Gaussian
13	BaF ₆	convex	65	9	11	1.31	3.010	6840	1.22	Gaussian

归纳所测结果,对于当前常用光学元件,其表面微观轮廓具有如下特征:

1. 相关函数或表面微观轮廓概率密度函数为高斯型;
2. 峰谷值 PV: 40 nm ~ 150 nm;
3. 平均算术偏差 R_a : 6nm ~ 18nm;
4. 均方差 σ 1 nm ~ 20 nm ($\begin{matrix} 0.012 & 0.025 \\ \nabla & \nabla \end{matrix}$);
5. 斜率均方差 Δq : $0^\circ \sim 2^\circ$;
6. 表面平均波长 $l(a)$: $(2.5 \sim 79) \times 10^3$ nm;
7. 相关长度 l_c : 550 nm ~ 1800 nm

J. M. Bennet 曾观测到: 熔石英表面镀银膜后,其粗糙度增大^[5]。我们对多种镀增透镜的抛光光学玻璃表面进行了比较测试,也得到了类似的结论。部分测试结果列于表2中。

Table 2 Roughness of optical glass surfaces before and after being deposited with anti-reflective thin film

No.	glass type	form	before coating		after coating	
			R_a (nm)	σ (nm)	R_a (nm)	σ (nm)
1	K ₉	pane	8	9	10	13
2	ZK ₈	p lane	8	10	8	10
3	BaK ₇	p lane	9	12	10	12
4	ZF ₂	p lane	6	8	7	9
5	ZBaF ₂	p lane	9	11	10	12

光学元件表面镀增透膜后,粗糙度略有增加,为0~ 4 nm,但微观轮廓概率密函数仍为高斯型。

4 光学元件表面轮廓的一般特征

当前通常认为:光学元件表面轮廓只包含面形、粗糙度和光洁度等三种成分^[11]。根据大量测试结果,我们发现,光学元件表面轮廓除包含上述三种成份外,还可能包含有波纹度,如图3中的No. 6 ZF6- 2, No. 1 K9- 1, No. 4 BaK7- 2等的微观轮廓实测曲线中,明显包含有波纹度的特征。这种现象尤多见于抛光的初始阶段。

对于大多数常用光学元件,根据我们的经验,其表面轮廓线四种成分的空间频率和幅度大致范围如表3如示。

Table 3 Spatial frequency and undulation amplitude of surface profile for each component part (D: diameter of aperture; λ : wavelength)

No.	component part	spatial frequency	undulation amplitude
1	form	$1/0.5D$	0~ 5 μm
2	waviness	$1/(0.5D \sim 0.05D)$	0~ 5 μm
3	roughness	$1/(\mu\text{m} \sim \text{order} \sim \lambda)$	0~ 1 μm
4	finish	$1/(\mu\text{m} \sim \text{order} \sim \lambda)$	0~ 1 μm

波纹度和面形曲线的空间频率可分别视为中频和低频的,其分布可用确定的函数来描述;而粗糙度和光洁度曲线的空间频率可视作高频的,其分布为随机的,需用统计方法来描述。

从频谱理论观点,光学元件表面轮廓中出现波纹度,并不是不可思议的。过去,由于面形检测采用的是低分辨面形检测干涉仪,而粗糙度检测采用的是高分辨率显微干涉仪,因而波纹度被“漏检”,未能被发现。波纹度对像质的影响有待进行深入研究。

本文实测工作是在韩荣久先生大力支持和帮助下完成的,周长新先生为本文提供了有益数据,在此谨表衷心谢意。

参 考 文 献

- [1] Noll Robert J. Effect of Mid- and High-spatial Frequencies on Optical Performance. Opt Eng, 1979, **18**(9): 137~ 142
- [2] Rasigni G, Varnier F, Rasigni M, Palmari J P. Autocovariance functions for Polished Optical Surfaces. J O S A, 1983, **76**(2): 222
- [3] Rasigni G, Rasigni M, Palmari P, Dussert C, Varnier F. Statistical Parameters for Random and Pseudorandom Rough Surfaces. J O S A, 1985, **5**(1): 99~ 103
- [4] Eastman J, Baumeister P. The Microstructure of Polished Optical Surfaces. Opt Commun, 1974, **12**(4): 418
- [5] Bennett J M. Measurement of rms roughness, autocovariance function and other statistical properties of optical surface using a FECO scanning interferometer. Appl Opt, 1976, **15**(11): 2075
- [6] Church E L. Comments on Correlation Length. Proc SPIE, 1986, **680**: 102
- [7] 顾德门 J W. 统计光学. 科学出版社, 1992: 15

- [8] Varnier F, Rasigni M, Rasigni G, Palmari J P, Lebaria A. Height and Slope Distribution for Surfaces of Rough Metallic Deposits *Appl Opt*, 1982, **21**(20): 3681
- [9] 顾德门 J W. 统计光学 北京: 科学出版社, 1992: 68
- [10] Gecell T F, Arakawa E T, Williams M W, Hammo R N. Optical and Photoelectric Properties of Mg in the Vacuum Ultraviolet *Phys Rev B* 1972, **B7**: 5141
- [11] 光学仪器设计手册编辑组 光学仪器设计手册 北京: 国防工业出版社, 1971: 379~ 385

Microprofile and Profile of Optical Elements

*(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130022)*

Abstract

We studied the characteristics of surface profiles of the conventional optical elements and the features of the characteristic parameters of the surface microprofile and mutual relations between them, and tested the characteristic parameters of the surface profile of a great number of optical elements so as to determine the features and ranges of the surface microprofile.

Key words: Surface roughness Image quality evaluation, Surface profile characteristic parameter

向 阳, 男, 1963年11月生。1985年毕业于东北师范大学物理系, 获理学学士, 1988年毕业于东北师范大学理论物理专业, 获理学硕士; 1993年考取长春光机所博士研究生。主要从事全息与干涉计量新方法与技术研究。