

角度散斑相关方法表面粗糙度测量实验

刘恒彪 刘成林

(同济大学理学部, 上海 200092)

摘要 基于角度散斑相关原理开展了对喷砂表面粗糙度样块的粗糙度测量实验研究。通过对散斑图像数据的处理和分析,提出了求取角度散斑相关系数最大值的滑动相关算法。该算法能有效克服表面不平度、波度等因素的不利影响。从最佳测量条件出发,提出了最佳入射角增量的概念,并在此基础上形成了包括散斑图像采集过程和图像数据处理方法在内的一整套表面粗糙度测量方法。该测量方法的核心是对被测表面的多个激光照明区域和多个激光入射角下的远场散斑图像的采集及数据处理。实验结果表明,应用本测量方法得到的轮廓均方根偏差最佳估计值 σ_p 与表面样品给定的轮廓算术平均偏差 R_a 成很好的线性关系。

关键词 光学测量; 表面粗糙度; 激光散斑; 角度散斑相关方法; 滑动相关算法; 最佳测量条件

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0697

Experimental Research on Surface Roughness Measurement Using Angular-Speckle Correlation

Liu Hengbiao Liu Chenglin

(School of Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The surface roughness measurement is experimentally researched by using angular-speckle correlation method on blasted sand surface. Through the data processing and analysis of laser speckle patterns, moving correlation algorithm was presented to get the maximal angular-speckle correlation coefficients. This method can avoid the negative effects of surface flatness and waviness effectively. Under the prime measurement condition, the optimal incident angle increment of laser beam was given, and a method of surface roughness measurement including speckle pattern acquisition and processing was developed. The key of this method is that far-field speckle patterns in different incident angles and illumination areas of rough surface are detected and processed. The experimental results indicate that prime root-mean-square (RMS) deviation measured by this method is almost linear with the arithmetical mean deviation of the surface-samples.

Key words optical measurement; surface roughness; laser speckle; angular-speckle correlation method; moving correlation algorithm; optimal measurement condition

1 引 言

作为衡量零件加工质量的一个重要指标,表面粗糙度直接影响零件的配合、磨损、腐蚀等性质。常规的表面粗糙度测量是通过机械轮廓仪进行的静态、接触式测量。现代技术的进步,一方面为了提高生产效率、控制产品质量,对非接触、在线测量方法提出了要求,另一方面由于激光技术、计算机技术的发展,又为非接触、在线测量方法的实现提供了条

件。利用激光散斑现象可以进行表面粗糙度的非接触、在线测量。目前在理论上较为成熟的激光散斑表面粗糙度测量方法有角度散斑相关方法^[1~5]、双波长散斑相关方法^[2,3]、基于多色散斑延长效应的测量方法^[6~8]等。就表面粗糙度的计量标准而言,激光散斑表面粗糙度测量方法是间接的参数测量方法,其测量过程不是直接探测表面轮廓来计算粗糙度参数,而是采集由表面散射出的散斑场图像通过

收稿日期: 2008-05-23; 收到修改稿日期: 2008-09-09

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2005]383号)资助项目

作者简介: 刘恒彪(1962-),男,教授,主要从事光学测量技术方面的研究。E-mail: liuhb62@tongji.edu.cn

物理模型来反演粗糙度参数。一般来说,在物理模型中的粗糙表面统计模型和测量系统参数是经过简化的,与实际情况有一定偏差。因此,对于激光散斑表面粗糙度测量方法的实验研究,不是简单证实物理模型的正确性,而是要在物理模型的指导下提出合适的测量步骤和数据处理方法。本文从角度散斑相关表面粗糙度测量的物理模型出发,探讨测量步骤和数据处理方法问题。

2 角度散斑相关系数与表面粗糙度的理论关系

如图 1,一激光束在 $x-z$ 平面内分别以角度 α 和角度 $\alpha + \Delta\alpha$ 先后入射粗糙表面的同一区域;入射光经表面散射后,在透镜(焦距为 f)的后焦面上形成两个远场散斑场。其强度分布分别为 $I_1(\xi, \eta)$ 和 $I_2(\xi, \eta)$ 。在两个散斑场上分别取观测点 (ξ_1, η_1) 和 (ξ_2, η_2) ,并记 $I_1 = I_1(\xi_1, \eta_1)$ 和 $I_2 = I_2(\xi_2, \eta_2)$,可以定义角度散斑相关系数:

$$\gamma_{12} = \frac{\langle (I_1 - \langle I_1 \rangle)(I_2 - \langle I_2 \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (I_1 - \langle I_1 \rangle)^2 \rangle \langle (I_2 - \langle I_2 \rangle)^2 \rangle}}, \quad (1)$$

其中 $\langle \dots \rangle$ 表示对粗糙表面微观轮廓的集平均。

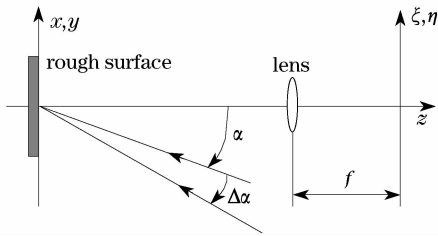


图 1 角度散斑相关表面粗糙度测量原理示意图

Fig. 1 Sketch map of surface roughness measurement based on angular-speckle correlation

对于表面高度值服从均值为 0 的正态分布、表面轮廓自相关函数为高斯函数、轮廓斜率很小、轮廓均方根偏差 σ_h 远大于激光波长的粗糙表面,当入射激光束为高斯光束,其束腰半径 L 远大于表面自相关长度,激光入射角改变量 $\Delta\alpha$ 很小。并且 $\Delta\alpha \ll \alpha$ 时,根据基尔霍夫电磁波散射理论可导出角度散斑相关系数与表面轮廓均方根偏差的关系^[2]:

$$\begin{aligned} \gamma_{12} = & \exp[-(\sigma_h k \sin \alpha \Delta\alpha)^2] \times \\ & \exp\left[-\left(\frac{Lk}{2f \cos \alpha}\right)^2 (\xi_1 - \xi_2 + f \cos \alpha \Delta\alpha)^2\right] \times \\ & \exp\left[-\left(\frac{Lk}{2f}\right)^2 (\eta_1 - \eta_2)^2\right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为激光波长。当在两个散斑场上的对应观测点位置满足 $\xi_2 - \xi_1 = f \cos \alpha \Delta\alpha$ 和 $\eta_2 - \eta_1 = 0$

关系时,角度散斑相关系数达到最大值:

$$\gamma_{\max} = \exp[-(\sigma_h k \sin \alpha \Delta\alpha)^2]. \quad (3)$$

为进行角度散斑相关系数所要求的集平均统计,实验时必须不断更换被测粗糙表面的激光照明区域。对每一区域分别从两个角度入射激光束,并采集与两个入射角对应的远场散斑场上对应观测点的光强。这样的测量方式费时,对散斑场强度分布信息的利用率低。模拟研究表明,可以用散斑场的空间平均^[5]代替集平均来计算角度散斑相关系数,以提高散斑场强度分布信息的利用率,缩短测量时间。为计算空间平均角度散斑相关系数的最大值 γ_{\max}^S ,原则上可在与两个入射角 α 和 $\alpha + \Delta\alpha$ 对应的二维远场散斑场中选取一系列观测点对 $\{(\xi_1, \eta_1); (\xi_2, \eta_2)\}$,每一点对的位置须满足 $\xi_2 - \xi_1 = f \cos \alpha \Delta\alpha$ 和 $\eta_2 - \eta_1 = 0$ 的关系,将两个散斑场上在观察点对处的强度值 $I_1(\xi_1, \eta_1)$ 和 $I_2(\xi_2, \eta_2)$ 分别代入(1)式中的 I_1 和 I_2 ,并将(1)式中的集平均改为在二维散斑场上的空间平均。在确定了角度散斑相关系数后,根据上述理论关系可计算粗糙表面的轮廓均方根偏差:

$$\sigma_h = \sqrt{-\ln \gamma_{\max}^S} / (k \sin \alpha \Delta\alpha). \quad (4)$$

3 远场散斑图像的采集

根据角度散斑相关表面粗糙度测量原理构建的散斑图像采集装置如图 2 所示。由半导体激光器、限束光阑和透镜 1 构成激光束投射单元。激光器和光阑安装在一维电动平移台上。透镜 1 的左侧焦点应精确调节到与被测表面的几何轮廓重合。当一维电动平移台沿垂直于透镜 1 光轴的方向移动时,激光束被侧向平移,在被测表面上的激光入射角随之改变,而入射光光轴与被测表面的交点则保持不动。被测表面安放在一个二维电动平移台上,以便改变激光照明区域。入射激光束经被测粗糙表面散射后,在透镜 2 的后焦面上形成远场散斑场。利用 CCD 图像传感器采集散斑场的强度分布信号,经模/数转换后输入计算机进行后续处理。

实验装置中,半导体激光器的波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$;图像传感器的像元数为 1024×768 ,像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$,动态范围为 8 Bit;透镜 1 的焦距 $f_1 = 400 \text{ mm}$;透镜 2 的焦距 $f_2 = 100 \text{ mm}$ 。所采用的表面样品为 $R_a = 25 \mu\text{m}$ 、 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $6.3 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$ 的四个喷砂表面粗糙度比较样块(图 3)。

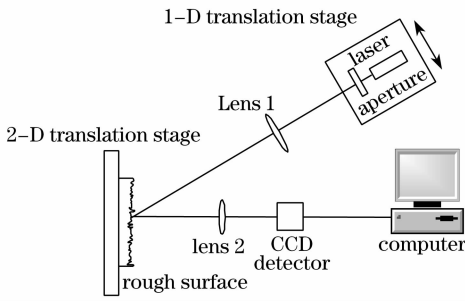


图 2 散斑图像采集装置

Fig. 2 Setup of speckle pattern acquisition

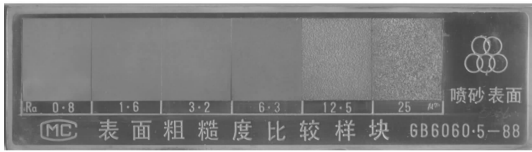


图 3 喷砂表面样品

Fig. 3 Sample of blasted sand surface

4 散斑图像的数据处理

4.1 角度散斑相关系数最大值的确定

根据(4)式计算表面的轮廓均方根偏差 σ_h ，首先要确定空间平均角度散斑相关系数的最大值 γ_{\max}^S 。由于表面不平度和波度、环境振动等因素的影响，激光束对粗糙表面的人射角会在实验给定值附近随机波动。鉴于(2)式，如果根据 $\Delta\xi = \xi_1 - \xi_2 + f \cos \alpha \Delta\alpha = 0$ 和 $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2 = 0$ 的关系由实验给定的两个人射角度值 α 和 $\alpha + \Delta\alpha$ 确定观察点对 (ξ_1, η_1) 和 (ξ_2, η_2) ，并由观察点对处的散斑场强度值 $I_1(\xi_1, \eta_1)$ 和 $I_2(\xi_2, \eta_2)$ 计算散斑相关系数的最大值，就会带来较大误差。为了避开这个问题，本文采用“滑动相关算法”求取散斑相关系数的最大值。

“滑动相关算法”首先是在激光入射角变化前后的两幅散斑图上依次计算不同位置偏移量 $\Delta\xi = m\delta_\xi, \Delta\eta = n\delta_\eta$ 时的散斑相关系数：

$$\gamma^S(m\delta_\xi, n\delta_\eta) = \frac{\langle \tilde{I}_1(\xi, \eta) \tilde{I}_2(\xi + f \cos \alpha \Delta\alpha + m\delta_\xi, \eta + n\delta_\eta) \rangle_S}{\sqrt{\langle \tilde{I}_1^2(\xi, \eta) \rangle_S \langle \tilde{I}_2^2(\xi + f \cos \alpha \Delta\alpha + m\delta_\xi, \eta + n\delta_\eta) \rangle_S}}, \quad m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (5)$$

其中 δ_ξ, δ_η 分别为 ξ 和 η 方向上的偏移步距， $\langle \dots \rangle_S$ 为在散斑图上的空间平均：

$$\tilde{I}_1(\xi, \eta) = I_1(\xi, \eta) - \langle I_1(\xi, \eta) \rangle_S,$$

$$\tilde{I}_2(\xi, \eta) = I_2(\xi, \eta) - \langle I_2(\xi, \eta) \rangle_S;$$

然后在这些相关系数中通过插值算法求取最大值。图 4 给出了对 R_a 分别为 $6.3 \mu\text{m}$ 和 $12.5 \mu\text{m}$ 的

个粗糙度样块进行散斑场强度测量后所处理出的角度散斑相关系数关于 $\Delta\xi$ 的分布曲线 ($\Delta\eta = 0$)。在图中容易看出，角度散斑相关系数的最大值明显偏离由实验参数确定的理论位置 ($\Delta\xi = 0$)；随着 $\Delta\xi$ 推移了几个像元的距离后，散斑相关系数会从最大值衰减到接近于 0。

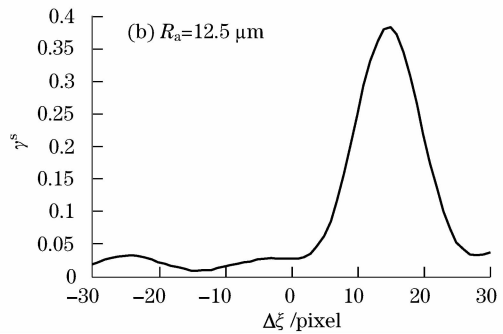
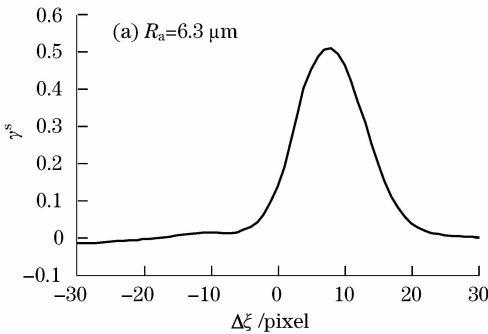


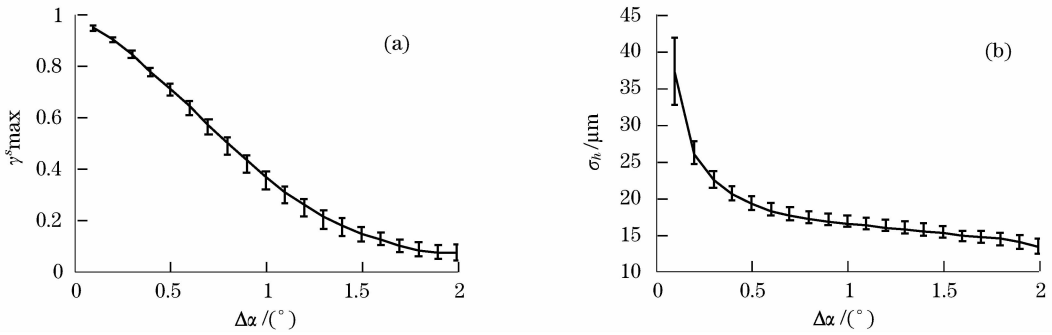
图 4 空间平均角度散斑相关系数分布曲线

Fig. 4 Distribution of spatial average angular-speckle correlation coefficient

4.2 角度散斑相关系数的误差对表面粗糙度测量结果的影响

为探讨有效的测量步骤和数据处理方法，对 $R_a = 25 \mu\text{m}, 12.5 \mu\text{m}, 6.3 \mu\text{m}, 3.2 \mu\text{m}$ 的四个喷砂表面粗糙度样块进行了角度散斑相关粗糙度测量实验。实验时对每一表面样品分别在 8 个不同区域，每一区域又分别在不同的激光入射角下采集了远场散斑图像。初始激光入射角为 $\alpha = 21^\circ$ 。对于各表面

样品的每个激光照明区域，运用滑动相关算法计算在初始入射角和不同入射角度增量 $\Delta\alpha$ 时的角度散斑相关系数最大值 γ_{\max}^S 。此后，根据(4)式计算表面轮廓均方根偏差。图 5 给出了 $R_a = 12.5 \mu\text{m}$ 表面样品的角度散斑相关系数最大值和表面轮廓均方根偏差随激光入射角度增量的变化规律。其中图 5(a) 的曲线是对应 8 个激光照明区域的角度散斑相关系数最大值的算术平均值，误差带标明散斑相关系数

图 5 γ_{\max}^s 和 σ_h 随 $\Delta\alpha$ 的变化Fig. 5 Variation of γ_{\max}^s and σ_h with $\Delta\alpha$

的分布范围;图 5(b)曲线是对应 8 个激光照明区域的表面轮廓均方根偏差的算术平均值,误差带标明轮廓均方根偏差的分布范围。对于一个表面样品,表面轮廓均方根偏差 σ_h 的平均值应是一个不随激光入射角增量 $\Delta\alpha$ 的改变的常数。而图 5(b)却显示出明显的测量误差,当 $\Delta\alpha$ 较小时, σ_h 的平均值随着 $\Delta\alpha$ 的减小迅速增大;当 $\Delta\alpha$ 较大时, σ_h 的平均值虽表现出随着 $\Delta\alpha$ 的增大而下降的趋势,但相当平缓。对于不同的粗糙表面样品,表面轮廓均方根偏差的平均值 $\bar{\sigma}_h$ 随 $\Delta\alpha$ 的变化规律是相同的(图 6)。

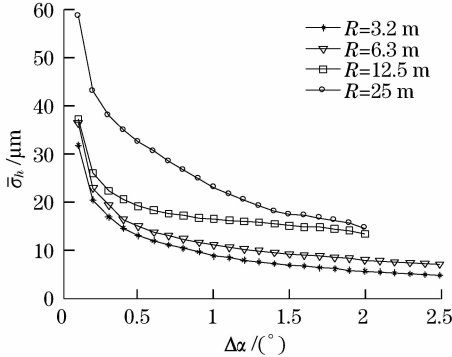


图 6 不同表面样品的轮廓均方根偏差测量值

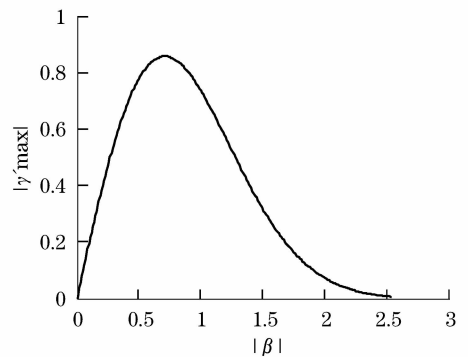
Fig. 6 Measurement value of RMS deviation for different surface samples

考察(3)式,可以得出表面轮廓均方根偏差平均值 $\bar{\sigma}_h$ 的测量误差随激光入射角增量 $\Delta\alpha$ 的变化规律。如果记 $\beta = \sigma_h k \sin\alpha \Delta\alpha$,那么角度散斑相关系数最大值 $\gamma_{\max} = \exp(-\beta^2)$ 。 γ_{\max} 对 β 的导数为

$$\gamma'_{\max} = \frac{d\gamma_{\max}}{d\beta} = -2\beta \exp(-\beta^2). \quad (6)$$

如图 7 所示,该导数的绝对值 $|\gamma'_{\max}|$ 随 $|\beta|$ 的分布是一条单峰曲线,当 $|\beta| = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$, $|\gamma'_{\max}|$ 达到最大值。事实上, $|\gamma'_{\max}|$ 的大小反映了角度散斑相关系数 γ_{\max} 与表面轮廓均方根偏差 σ_h 之间的响应灵敏度:当 $|\gamma'_{\max}|$ 较小时, σ_h 的单位改变量会导致一

个较小的 γ_{\max} 的改变量;反过来说, γ_{\max} 的单位改变量会导致一个较大的 σ_h 的改变量。据此,可以解释在图 5 和图 6 中当入射角度增量较小时表面轮廓均方根偏差的平均值明显偏大这一现象。对于一个具有确定 σ_h 值的粗糙表面,当激光波长 λ 和初始入射角 α 确定后, $|\beta|$ 随入射角度改变量 $\Delta\alpha$ 成正比地变化。当 $\Delta\alpha$ 较小时, $|\beta|$ 较小, $|\gamma'_{\max}|$ 也较小。此时,一定量的 γ_{\max} 的误差会造成一个较大的 σ_h 的误差。为尽可能减小 σ_h 的测量误差,应选择合适的 $\Delta\alpha$,以满足最佳测量条件^[5]: $|\beta| = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$,从而达到 $|\gamma'_{\max}|$ 的最大值。

图 7 $|\gamma'_{\max}|$ 随 $|\beta|$ 的变化Fig. 7 Variation of $|\gamma'_{\max}|$ with $|\beta|$

4.3 最佳入射角增量的确定

在最佳测量条件下,根据(3)式算得的角度散斑相关系数 $\gamma_{\max} = \exp[-(1/2)] \approx 0.607$ 。当被测表面在不同照明区域的角度散斑相关系数最大值的平均值 $\langle \gamma_{\max}^s \rangle$,随激光入射角增量的变化曲线确定后,在曲线上通过插值方法找出与 $\langle \gamma_{\max}^s \rangle = 0.607$ 对应的最佳入射角增量 $\Delta\alpha_p$,将最佳入射角增量代入最佳测量条件 $|\beta| = |\sigma_h k \sin\alpha \Delta\alpha_p| = 0.707$ 即可求出表面轮廓均方根偏差的最佳估计值 σ_p 。

通过寻找最佳入射角增量的途径,实验得出了 4 个表面样品的轮廓均方根偏差最佳估计值,结果

如表 1 和图 8 所示。在确定最佳入射角增量时,应用了三次样条插值方法。结果表明,在实验涉及的测量范围内($R_a=3.2\sim 25\ \mu\text{m}$),轮廓均方根偏差最佳估计值 σ_p 与表面样品的轮廓算术平均偏差 R_a 成很好的线性关系。

表 1 表面粗糙度测量实验结果

Table 1 Results of surface roughness measurement

$R_a/\mu\text{m}$	$\sigma_p/\mu\text{m}$	$\sigma_{pt}/\mu\text{m}$	$ \sigma_p - \sigma_{pt} /\mu\text{m}$
25	37.5	37.2	0.3
12.5	17.9	18.9	1.0
6.3	10.7	9.8	0.9
3.2	5.1	5.3	0.2

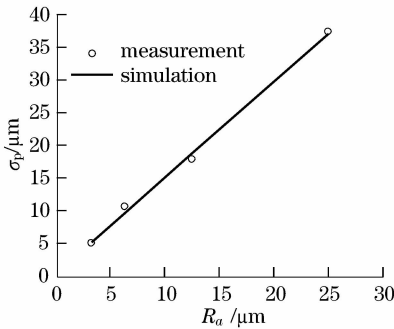


图 8 表面粗糙度测量实验结果

Fig. 8 Results of surface roughness measurement

5 结 论

基于角度散斑相关原理开展了对喷砂表面粗糙度样块的粗糙度测量实验研究。在实验过程中,对各样块分别在不同区域、多个激光入射角下采集了远场散斑图像。为克服表面不平度、波度等因素的影响,对于各表面样品的每个激光照明区域,运用滑

动相关算法求得了在初始入射角和不同入射角度增量时的角度散斑相关系数最大值。通过分析角度散斑相关系数的误差对表面粗糙度测量结果的影响,提出了最佳入射角增量的概念。在各表面样品的角度散斑相关系数 $\langle \gamma_{\max} \rangle$ 随入射角度增量 $\Delta\alpha$ 的变化曲线上确定了最佳入射角度增量 $\Delta\alpha_p$ 后,应用最佳测量条件就可确定表面轮廓均方根偏差的最佳估计值 σ_p 。

参 考 文 献

- 1 D. Léger, E. Mathieu, J. C. Perrin. Optical surface roughness determination using speckle correlation technique[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(4):872~877
- 2 Bernd Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8):1297~1304
- 3 Ichirou Yamaguchi, Koichi Kobayashi *et al.*. Measurement of surface roughness by speckle correlation[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(11): 2753~2761
- 4 Ulf Persson. Surface roughness measurement on machined surfaces using angular speckle correlation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **180**(1-3):233~238
- 5 Wang Jing, Liu Hengbiao. Numerical simulation of surface roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 260~264
王 婧,刘恒彪.空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):260~264
- 6 Peter Lehmann, Stefan Patzelt *et al.*. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10):2188~2197
- 7 Peter Lehmann. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10):2008~2014
- 8 Liu Hengbiao, Chi Jingchun. Analysis of affecting factors on surface roughness measurement based on polychromatic speckle elongation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 280~284
刘恒彪,池景春.基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量及影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2):280~284