

表面质量控制及检测

各向异性自相关长度对三维计算机模拟表面参数的影响

惠玉祥, 王悦昶, 刘莹

(清华大学, 北京 100084)

摘要: **目的** 研究计算机模拟过程中不同自相关长度对重构后表面表征参数的影响。**方法** 采用新 FFT 方法, 保持特定参数(高度均方根、偏态、峰值)不变, 对不同自相关长度(3、10、30、100)在两个方向上的不同组合, 进行了共 16 次三维粗糙表面形貌计算机模拟实验, 并从不同方向自相关长度组合的角度, 对与形貌特征关联度较高的参数影响进行了分析。**结果** 算数平均峰曲率、峰密度、均方根斜率总体上和两个方向上的自相关长度呈负相关, 而最快下降自相关长度与两个方向上的自相关长度呈正相关, 纹理高宽比与两个方向的自相关长度是否接近有关, 其中峰密度、最快下降自相关长度都对不同自相关长度中的较小自相关长度比较敏感, 而对较大自相关长度的变化反应较小, 算数平均峰曲率、均方根斜率则表现出相同的较高敏感性。**结论** 表面表征参数中的高度分布参数和自相关长度没有关系, 而结构比例方面的参数和自相关长度关联显著。

关键词: 各向异性; 自相关长度; 表征参数; 计算机模拟; 三维粗糙表面

中图分类号: TG84 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0246-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.035

Effects of Anisotropic Autocorrelation Length on Parameters of 3D Computer Simulation Surface

HUI Yu-xiang, WANG Yue-chang, LIU Ying

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of autocorrelation length on reconstructed surface characterization parameters in the process of computer simulation, and lay a foundation for exploring the relationship among different surface characterization parameters, and also the relationship between autocorrelation function (ACF) and surface properties of usability. Computer simulation surface test of 3D rough surface morphology was carried out 16 times for various combinations of autocorrelation length 3, 10, 30, 100 in two directions using the same specific parameters (RMS, Skewness, Kurtosis) in the new FFT method proposed by the author. The effects of parameters which were correlated with morphological features were analyzed from the

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-04-21

Received: 2017-12-18; Revised: 2018-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB57303); 国家自然科学基金重点项目(51735006)

Fund: Supported by the National Key Basic Research Development Plan (2015CB57303) and the Key Projects of National Natural Science Foundation of China (51735006)

作者简介: 惠玉祥(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为密封技术。

Biography: HUI Yu-xiang (1994—), Male, Master, Research focus: sealing technology.

通讯作者: 刘莹(1965—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为密封与润滑。

Corresponding author: LIU Ying (1965—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: sealing and lubrication.

perspective of combinations of autocorrelation length in different direction. Mean summit curvature, summit density and RMS slope were negatively correlated with autocorrelation length in two different directions. However, the fastest descending autocorrelation length showed a positive correlation, and texture aspect ratio was related to proximity of autocorrelation length in two directions. Summit density and the fastest descending auto-correlation length were both sensitive to smaller autocorrelation length among different autocorrelation lengths, but less sensitive to changes in larger autocorrelation length. Mean summit curvature and RMS slope showed the same high sensitivity. Height distribution parameters among surface characterization parameters are not correlated with autocorrelation length on computer simulation surface, while structure proportion parameters are significantly correlated with autocorrelation length.

KEY WORDS: anisotropy; autocorrelation length; characterization parameters; computer simulation; three-dimensional rough surface;

建立表面形貌的数学表达是粗糙表面摩擦副性能模型研究的基础^[1-3]。表面形貌的数学表达作为摩擦学性能数值预测的输入参数,可以通过两种方式获得:实际测量和计算机模拟。近年来,计算机模拟因为其便利快速的优势而逐渐取代了实际测量的方法^[4],其优缺点见表 1。

表 1 实际测量和计算机模拟的优缺点
Tab.1 Advantages and disadvantages of actual measurement and computer simulation

	优点	缺点
实际测量	数据准确,所有数据均来自实际表面	费时费力,受测量工具等影响大,数据仍需处理才能作为输入参数
计算机模拟	快速方便,数据可直接使用	只利用了实际表面中部分参数,对其他参数可能存在偏差

1971 年,Whitehouse 和 Bendat^[5]指出高斯分布在模拟表面中的重要地位,并引入了指数型自相关函数,用以描述自相关长度。1992 年 Hu 等人^[6]基于统计参数生成了三维粗糙表面,2008 年宋俊杰等^[7]通过 FFT 和 Jhonson 转换系统得到非高斯随机表面,并对其误差进行了评估。Pawlus^[8]以分层理论为基础对更复杂的三维粗糙表面进行了分析。2017 年,Yuechang Wang 等人^[9]也提出了一种生成给定自相关函数和高度分布函数非高斯表面的方法且偏差很小。

通常所说的数值模拟表面都是对表面统计学描述的重现,即得到具有指定的自相关函数和高度分布函数的三维粗糙表面。计算机模拟过程中,输入的粗糙表面部分统计参数,如自相关函数、标准差、偏态与峰值等,与其他未输入参数之间的关联性是计算机模拟表面误差的主要来源。研究自相关长度,特别是各向异性的自相关长度对能反映表面特征的表面参数的影响规律,有助于对不同表面表征参数相互关联、自相关函数设计和表面使役性能相互关系的认

识。Nayak^[10]提出高度分布函数和自相关函数与其他表面表征参数之间存在关联。李群松等^[11]也研究了二维粗糙表面自相关函数对表面轮廓参数的影响规律,但由于各向异性的存在,二维轮廓不能简单推广到三维表面上来。2017 年,林伟轩^[12]通过数字滤波法研究了高度分布函数和自相关函数之间互相作用对三维粗糙表面表征参数的影响,但并未指出各向异性的不同自相关长度对重构表面表征参数的具体影响。各向异性表面在工程应用和研究中占据主要地位,针对各向异性表面研究不同方向的自相关长度对粗糙表面的影响程度,对于粗糙表面的仿真模拟十分重要。因此,本文在 Yuechang Wang^[9]提出的重构表面方法的基础上,对各向异性表面的自相关长度与三维粗糙表面表征参数之间的关系进行了研究,总结出不同自相关长度对重构后三维表征参数的影响规律,并对影响机制进行了探索。

1 表征参数选择

计算三维表征参数需要一个参考位置作为参考面。本文以形貌高度平均值所在的水平面为参考面。重构后,表面以点的形式出现,为了方便比较,本文生成的表面设定为 3 mm×3 mm。

Michigan Metrology^[13]总结了 3D 表面的粗糙度表征参数,分为 4 大类 34 个参数。本文选取各类参数中对润滑性能影响较大,且和形貌特征关联度较高的代表性参数^[14]进行了分析。由于生成的表面为离散表面,这里只给出离散的定义式。

1.1 高度参数 (Height)

高度均方根 S_q :

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

(1)

式中: Z 为粗糙表面离散点的 z 轴方向坐标; M 、 N 为生成表面 x 、 y 方向点数,本文中 $M=N=1024$ 。

S_a 表征了选取范围内表面高度和谷深的平均值:

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |z(x_i, y_i)| \quad (2)$$

偏态 S_{sk} :

$$S_{sk} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{1.5}} \quad (3)$$

式中: μ_i ($i=2, 3, 4$) 为该组数据的 i 阶中心距, 其值大小反映偏离中心分布的歪斜程度。特殊情况下, $i=2$ 时, μ_i 为方差, 高斯表面的偏态为零。

峰值 S_{ku} :

$$S_{ku} = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} \quad (4)$$

高斯粗糙表面的峰值为 3, 其值大小反映了高度分布曲线平的程度 (或尖的程度)。

1.2 空间参数 (Spatial)

自相关长度最快下降长度 (S_{cal}) 用来表征自相关函数的自相关特征, 与表面相互作用和摩擦学中的摩擦磨损有密切联系。

$$S_{cal} = \min(\sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}), \quad R(\tau_x, \tau_y) < 0.2 \quad (5)$$

$$R_z(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} z(i, j)z(i+k, j+l) \quad (6)$$

式中: τ_x 、 τ_y 分别为 x 与 y 方向的相关长度; R 为标准化后的自相关函数; R_z 为自相关函数, 其标准化过程用 R_z 除以 R 的最大值。

结构形状比例 (S_{tr}) 主要识别形貌的类型和形貌的相似性。

$$S_{tr} = \frac{\bar{R}_{fd}}{\bar{R}_{sd}} \quad (7)$$

式中: \bar{R}_{fd} 为区域内自相关函数从任意方向变为原来 20% 时的最短长度; \bar{R}_{sd} 为最长长度。

1.3 混合参数 (Hybrid)

均方根斜率 S_{dq} 是一个用来描述表面区域内斜率的常用参数, 通常用作评估润滑性能, 因为该参数涉及到表面可能被流体覆盖的情况。 S_{dq} 和表面的高度和空间分布有关。

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N \left[\left(\frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

平均顶点曲率 S_{sc} 用来预测不同载荷条件下塑性形变和弹性形变的大小, 从而用来预测摩擦磨损时接触的实际表面积。

$$S_{sc} = \frac{1}{MN} \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^N \left[\frac{\partial^2 z(x_k, y_k)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x_k, y_k)}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

顶峰密度 S_{ds} 是反映某一区域内峰顶数目的多少, 这和物体表面实体接触、润滑性能等都有较大关系。

$$S_{ds} = \frac{\text{峰顶数目}}{MN} \quad (10)$$

2 计算机模拟三维表面的形貌重构

完整描述一个三维粗糙表面需要两方面的统计函数, 分别为自相关函数和高度分布函数。高度分布函数中涉及的参数有偏态和峰度。自相关函数主要包含的参数有标准差和不同方向的自相关长度, 三维粗糙表面的自相关阐述定义如式 (6)。自相关函数主要描述粗糙表面空间点的依赖程度。

以研磨后的石墨表面为例, 按照定义绘制出自相关函数 (图 1), 可以看出其最高点 (即与本身依赖程度最大点), 随着自相关距离的不断增大, 自相关函数值不断下降。

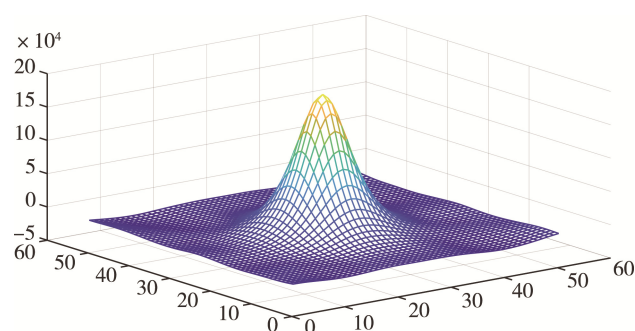


图 1 石墨研磨表面的自相关函数

Fig.1 Autocorrelation function of graphite grinding surface

从 Peklenik^[15] 的计算机重构二维表面研究开始, 人们沿用具有指数形式的自相关函数, 后来的大量实验也证明了对于大多数加工表面, 指数分布函数能较好地符合粗糙表面真实的自相关函数, 因此沿用至今, 如式 (11)。

$$R(k, l) = S_q^2 \exp\left[\ln(0.1) \sqrt{\left(\frac{k}{\beta_x}\right)^2 + \left(\frac{l}{\beta_y}\right)^2}\right] \quad (11)$$

式中: S_q 为粗糙表面的标准差; β_x 、 β_y 分别为 x 、 y 方向粗糙表面的自相关长度, 它们一般被定义为当自相关函数减小到其最大值的 10% 时的 x 、 y 方向的长度。

$$R_z(\beta_x, \beta_y) = \max(R_z(k, l)) \times 10\% \quad (12)$$

图 2 为石墨研磨表面的真实表面和指数形式分布用以重构的自相关函数对比图, 可以看出它们整体上吻合较好, 误差主要来源于其自相关函数不满足指数分布^[3]。

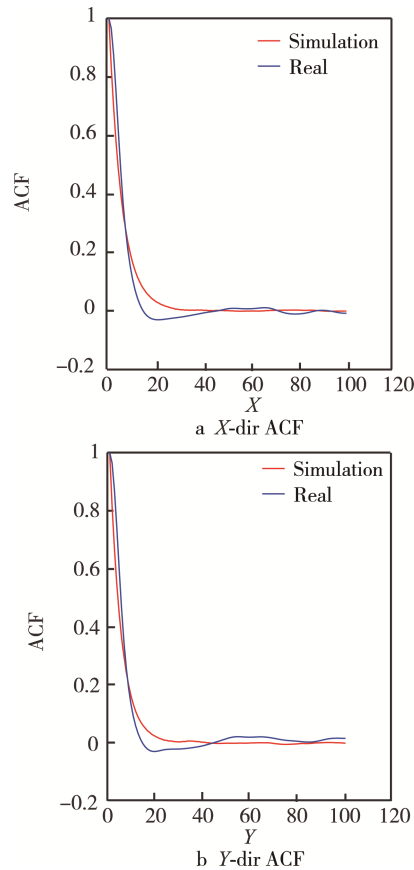


图 2 石墨研磨表面 x 、 y 方向的自相关函数重构和真实表面对比

Fig.2 Contrast of autocorrelation function simulation face with real face on of graphite grinding surface in x , y direction

3 各向异性表面自相关长度对计算机重构三维粗糙表面参数的影响

为了得到各向异性表面不同自相关长度对三维重构表面参数的影响，需要给定高度分布函数，以满足高斯分布，即偏态为 0、峰度为 3 的粗糙表面。根据式(11)，标准差大小并不影响整个数据的自相关函数，只是将整个自相关函数扩大了几倍，所以取定标准差即 $S_q=1$ 。选择 x 、 y 方向的自相关长度为 3，并作为整个实验对比的标准。

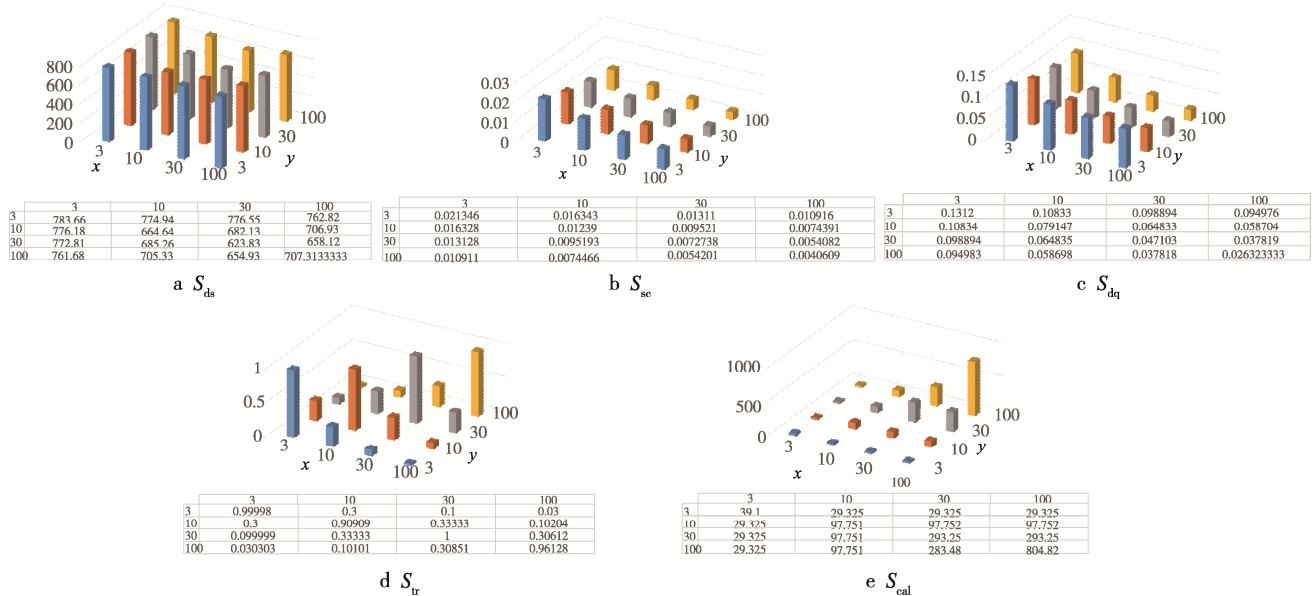
进行 4 组实验，固定 x 方向的自相关长度（3、10、30、100），每组实验增大 y 方向的自相关长度（3、10、30、100）。为避免随机误差对实验结果的影响，每次实验进行 3 次，取其平均值，可不再讨论随机误差的影响（与其他数据有明显偏差的舍弃，重做一次实验）。

首先，通过对比 S_a 、 S_q 、 S_{sk} 、 S_{ku} 和预设值的差距，观察计算机重构表面与目标表面的相似程度，可检验整个实验结果的可信度及准确性。其中，因 S_{sk} 预设值为 0，所以值本身大小即为 S_{sk} 的误差，其余各值误差都在 5% 以内。从表 2 可以得出， S_q 是 S_a 的 1.25 倍，这也和理论计算结果相符合。这说明所采用的计算机模拟方法对输入参数误差有较高的保证，证明了该方法的可行性。在此基础上规律性分析对自相关长度较敏感的形貌表征参数，如图 3 所示。

表 2 不同自相关长度组合重构前后参数误差

Tab.2 Parameter errors before and after reconstruction with different combinations of autocorrelation length

x	y	S_a/nm	S_q/nm	S_{sk}	S_{ku}	S_a 误差/%	S_q 误差/%	S_{ku} 误差/%
3	3	0.798 27	1.0001	0.000 221	2.9962	-0.22	0.01	-0.13
3	10	0.797 91	0.999 94	-0.001 29	3.0021	-0.26	-0.01	0.07
3	30	0.799 28	0.999 51	-0.022 79	2.9674	-0.09	-0.05	-1.09
3	100	0.798 88	0.999 49	-0.009 36	2.9619	-0.14	-0.05	-1.27
10	3	0.797 41	0.999 89	-0.004 48	3.0072	-0.32	-0.01	0.24
10	10	0.799 51	1.0006	-0.015 44	2.9728	-0.06	0.06	-0.91
10	30	0.797 84	0.998 32	0.014 914	2.9508	-0.27	-0.17	-1.64
10	100	0.795 82	0.995 63	-0.032 83	2.9498	-0.52	-0.44	-1.67
30	3	0.798 41	0.999 89	-0.008 26	2.9835	-0.20	-0.01	-0.55
30	10	0.798 96	0.998 82	0.053 325	2.9488	-0.13	-0.12	-1.71
30	30	0.7967	0.997 67	-0.009 89	3.0107	-0.41	-0.23	0.36
30	100	0.785 78	0.995 48	-0.157 88	3.03570	-1.78	-0.45	1.19
100	3	0.797 87	0.999 42	-0.023 89	3.0051	-0.27	-0.06	0.17
100	10	0.796 89	0.998	-0.046 51	2.9518	-0.39	-0.20	-1.61
100	30	0.792 35	0.986 91	-0.000 12	2.8593	-0.96	-1.31	-4.69
100	100	0.795 703	0.994 777	-0.023 51	2.938733	-3.77	-3.92	-1.75

图3 不同自相关长度取点对 S_{ds} 、 S_{sc} 、 S_{dq} 、 S_{tr} 、 S_{scal} 的影响Fig.3 Effects of (a) (b) (c) (d) (e) different autocorrelation length points on S_{ds} , S_{sc} , S_{dq} , S_{tr} , S_{scal} respectively

由图 3a 可以看出, S_{ds} 随着自相关长度的增大总体呈减小的趋势, 这与二维分析的结果相同。具体来说, 当 $\beta_x \ll \beta_y$ 时, β_y 对 S_{ds} 的影响较小, 当 β_x 增大时, β_y 对 S_{ds} 的影响才开始展现出来, 反之亦然。因此如想获得较小顶峰密度的粗糙表面, 可以从增大较小自相关长度入手。

图 3b 中显示, 随着 x 、 y 方向的自相关长度增大, S_{sc} 总体减小, 且无论两个方向自相关长度之间的差大小, 只要增大其中一个自相关长度, S_{sc} 总是减小, 也就是说自相关长度的增大会导致粗糙表面的顶峰变“平”, 这与直观分析相吻合。

S_{sq} 均方根斜率和 S 属于同一类参数, 由图 3c 可以看出, 其和 S_{sc} 的变化规律十分接近。 S_{cal} 测量的是自相关函数最快下降为最大值的 20% 时, 距离初始位置的长度。由图 3d 可知, 随着 x 、 y 方向自相关长度的增大, S_{cal} 增大。当两个自相关长度的差异较大时, 较大自相关长度的变化对 S_{cal} 的影响很小; 当较小自相关长度增大时, S_{cal} 迅速增大, 可以说, S_{cal} 的大小反应了较小自相关长度的值。

S_{tr} 随着自相关长度的变化相对复杂, 但总体来看, 当两个自相关长度越接近, x 、 y 方向表面特征越相像, S_{tr} 也就越大; 两者相同时, 粗糙表面变为各向同性表面, $S_{tr}=1$, 随着两个自相关长度的差距越来越大, S_{tr} 值越来越小。

4 结论

1) 三维粗糙表面形貌参数中的高度分布参数和自相关长度没有关系。

2) S_{sc} 、 S_{ds} 、 S_{dq} 总体上和两个方向上的自相关长

度呈负相关, 随着自相关长度的增大, 实际接触的面积减小, 顶峰的数目减小, 纹理的振幅和间距变大。 S_{cal} 呈正相关, 随着自相关长度的增大, 自相关函数也就下降得越慢, S_{cal} 的值越大。 S_{tr} 与两个方向的自相关长度是否接近有关, 越接近各向同性表面, S_{tr} 越接近 1。

3) S_{ds} 、 S_{cal} 都对不同自相关长度中的较小自相关长度比较敏感, 而对较大自相关长度的变化反应较小。 S_{sc} 、 S_{sq} 则表现出相同的敏感性。

4) 本文虽然仅对具有代表性的若干参数进行了分析, 但该方法也适用于其他参数的影响规律分析, 具有普遍性。另外, 因为 x 、 y 方向都是人为认定的, 具有完全的互换性, 即本文中分析图都是关于 $y=x$ 对称, 这也从侧面证明了这种分析方法的可靠性。

参考文献:

- [1] AO Y, WANG Q J, CHEN P. Simulating the Worn Surface in a Wear Process[J]. Wear, 2002, 252(1): 37-47.
- [2] 杨国庆, 熊美华, 洪军, 等. 3D 粗糙表面的数字化表征与接触特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2012(11): 58-63.
YANG G Q, XIONG M H, HONG J, et al. Numerical Characterization and Contact Performances for 3D Rough Surface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012(11): 58-63.
- [3] 廖东日. 基于 FFT 与线性变换方法的粗糙表面数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LIAO D R. The Simulation of Rough Surfaces Based on the FFT and the Linear Transformation Methods[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [4] 田爱玲, 孙钊, 于洵, 等. 非高斯随机粗糙表面的数

- 字模拟[J]. 系统仿真学报, 2009(10): 2840-2842.
- TIAN A L, SUN Z, YU X, et al. Numerical Simulation of Non-Gaussian Random Roughness Surface[J]. Journal of System Simulation, 2009(10): 2840-2842.
- [5] WHITEHOUSE D J, ARCHARD J F. The Properties of Random Surfaces of Significance in their Contact[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1971, 316(1524): 97-121.
- [6] HU Y Z, TONDER K. Simulation of 3-D Random Rough Surface by 2-D Digital Filter and Fourier Analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1992, 32(1): 83-90.
- [7] 宋俊杰, 田爱玲, 潘永强. 利用 FFT 实现对非高斯随机粗糙表面的模拟[J]. 西安工业大学学报, 2008(1): 10-14.
- SONG J J, TIAN A L, PAN Y Q. Simulation of Non-Gaussian Random Rough Surface by Using FFT [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2008(1): 10-14.
- [8] PAWLUS P. Simulation of Stratified Surface Topographies[J]. Wear, 2008, 264(5-6): 457-463.
- [9] WANG Y, LIU Y, ZHANG G, et al. A Simulation Method for Non-Gaussian Rough Surfaces Using FFT and Translation Process Theory[J]. Journal of Tribology, 2017, 140(2): 56.
- [10] NAYAK P R. Random Process Model of Rough Surfaces[J]. Journal of Lubrication Technology, 1971, 93(3): 398.
- [11] 李群松, 李琴, 陈东旭. 基于粗糙表面计算机仿真的粗糙度分布特性研究[J]. 机械设计, 2012(12): 6-9.
- LI Q S, LI Q, CHEN D X. Research on Roughness Distribution Characteristics Based on Computer Simulation of Rough Surface[J]. Journal of Machine Design, 2012(12): 6-9.
- [12] 林炜轩, 王江涌. 高度分布函数与自相关函数对表面粗糙度参数的影响[J]. 表面技术, 2017(1): 241-249.
- LIN W X, WANG J Y. Effects of Autocorrelation Function and Height Distribution Function on the 3D Surface Roughness Parameters[J]. Surface Technology, 2017(1): 241-249.
- [13] METROLOGY M. Glossary of Surface Texture Parameters[EB/OL]. [9-10]. <http://www.michmet.com/index.html>.
- [14] 惠玉祥. 不同加工工艺表面形貌三维特征提取及重构[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- HUI Y X. Three Dimensional Feature Extraction and Reconstruction of Surface Topography in Different Machining Processes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [15] PEKLENIK J. New Developments in Surface Characterization and Measurements by Means of Random Process Analysis[J]. Measurement Techniques, 1967, 182(311): 108-126.