

粗糙纹理表面数字化模拟

李培林, 炊明伟, 王巍, 徐晓东, 刘晓卫

(空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

[摘要] 粗糙表面的数字模拟是工件接触性能研究的前提与基础,而现有的粗糙表面模拟方法缺乏对表面纹理的考虑,为此提出了一种粗糙纹理表面数字化模拟方法。该方法通过数字化滤波模拟生成设定自相关函数的粗糙表面,同时模拟生成设定纹理参数的纹理表面,对粗糙表面和纹理表面进行归一化处理后,通过对纹理表面添加比例因子,将两表面进行合成处理,得到最终的粗糙纹理表面。通过模拟生成两种不同类型的粗糙纹理表面,表明提出的粗糙纹理表面数字化模拟方法能够准确模拟各种类型工件的表面形貌。

[关键词] 粗糙表面; 纹理表面; 数字化模拟; 自相关函数

[中图分类号] TG84

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)01-0088-03

Numerical Simulation of Rough Texture Surface

LI Pei-lin, CHUI Ming-wei, WANG Wei, XU Xiao-dong, LIU Xiao-wei

(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

[Abstract] The numerical simulation of rough surface is research precondition and basis of contact capacity of engineering assemblies. Aim at the shortcoming in the simulation of rough surfaces, a new numerical simulation method of rough texture surface was proposed. The rough surface with desired auto-correlation function was simulated by the digital filter method, and the texture surface with desired parameters was simulated. After normalization of rough surface and texture surface, two surfaces were synthesized by adding the proportion coefficient in the texture surface, the rough texture surface was simulated. At last, two types of rough texture surfaces were simulated. It showed that the proposed method could simulate accurately all kinds of surfaces.

[Key words] rough surface; texture surface; numerical simulation; autocorrelation function

机械零部件的接触性能,如摩擦、磨损、密封、疲劳强度等,与工件的粗糙表面形貌特征密切相关,因此准确获取工件的粗糙表面形貌数据,是研究机械零部件接触性能的基础和前提。获取粗糙表面形貌数据的方法主要有两种,一是直接测量,二是数字化模拟。直接测量能够获取最真实的零部件表面形貌数据,但受测量设备、样品、场地等条件制约,难以获取大量具有多种参数特征的粗糙表面数据,无法满足接触性能研究的需要。数字化模拟通过计算机即可实现,不受仪器、设备、场地等限制,操作起来方便、快捷,适用于任何系统,能够根据要求设定参数,模拟各种不同类型的粗糙表面形貌。因此,部分学者开始通过数字模拟这种更

加方便、有效的方法获取粗糙表面数据。

尽管人们在粗糙表面的模拟方面开展了大量研究工作,但大都未考虑粗糙表面中的纹理成分,或只是将粗糙表面与纹理表面进行简单的叠加^[1-7]。实际工件在加工和使用过程中受多种因素影响,表面都具有不同程度的规则纹理,文中结合粗糙表面模拟,提出了一种三维粗糙纹理表面数字化模拟方法。

1 粗糙表面模拟

设 $(M+m) \times (N+n)$ 矩阵 η 是由随机数生成的零均值、单位方差的高斯分布矩阵, $M \times N$ 矩阵 Z_R 是生成的

[收稿日期] 2012-10-05; **[修回日期]** 2012-11-17

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51075395)

[作者简介] 李培林(1963—),男,陕西西安人,副教授,主要研究方向为数字化设计及优化。

粗糙表面高度分布矩阵,则:

$$Z_R(i,j) = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n h(k,l) \cdot \eta(i+k,j+l) \quad (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中: $h(k,l)$ 是滤波函数。对上式进行傅里叶变换可得:

$$\tilde{Z}(\omega_x, \omega_y) = H(\omega_x, \omega_y) \cdot A(\omega_x, \omega_y) \quad (2)$$

式中: $A(\omega_x, \omega_y)$ 和 $\tilde{Z}(\omega_x, \omega_y)$ 分别是随机数生成矩阵 η 、粗糙表面高度分布矩阵 Z 的傅里叶变换; $H(\omega_x, \omega_y)$ 是滤波函数的傅里叶变换,可通过(3)式算得。

$$H(\omega_x, \omega_y) = [G(\omega_x, \omega_y)/C]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $G(\omega_x, \omega_y)$ 是功率谱密度函数,可由对自相关函数 $R(p,q)$ 进行傅里叶变换得到;对于服从高斯分布的随机序列, C 为常数。

2 纹理表面模拟

受加工方式等外界因素的影响,工件表面的纹理有多种类型,如条状、圆环状、圆弧状、交叉状等。文中假设模拟的纹理截面都是周期性的规则曲线,并且只考虑两种比较常见的纹理,即圆环状纹理和条纹状纹理。设 $M \times N$ 矩阵 Z_W 是纹理表面高度分布矩阵,则周期为 T 的纹理界面曲线 $f(t)$ 满足:

$$f(t) = f(t+n \cdot T) \quad n=0, \pm 1, \dots \quad (4)$$

设圆环状纹理的圆心点坐标为 (i_0, j_0) ,则任意一点到圆心的距离 $L(i,j)$ 为:

$$L(i,j) = \sqrt{(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2} \quad (5)$$

设条纹状纹理的偏斜角度为 θ ($\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$),则任意一点到起始条纹的距离 $L(i,j)$ 为:

$$L(i,j) = \frac{|j - \tan \theta \cdot i - \beta|}{\sqrt{(\tan \theta)^2 + 1}} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \beta = \begin{cases} -M \cdot \tan \theta & 0^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ 1 - \tan \theta & 90^\circ \leq \theta < 180^\circ \end{cases}$$

纹理表面任意一点高度值 $Z_W(i,j)$ 为:

$$Z_W(i,j) = f(L(i,j)) \quad (i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

3 粗糙纹理表面合成

在工件的表面形貌中,粗糙表面和纹理表面的成分不同,因此在纹理粗糙表面合成过程中,首先对模拟生成的纹理表面和粗糙表面进行归一化,即将两个表面转换成均值为0、标准差为1的表面。设 \hat{Z}_R 和 \hat{Z}_W

分别是由粗糙表面 Z_R 、纹理表面 Z_W 归一化得到的,则:

$$\begin{cases} \hat{Z}_R = (Z_R - \mu_R) / \delta_R \\ \hat{Z}_W = (Z_W - \mu_W) / \delta_W \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_R, δ_R 分别是粗糙表面 Z_R 的均值和标准差; μ_W, δ_W 分别是纹理表面 Z_W 的均值和标准差。设归一化后的纹理表面相对粗糙表面的比例因子为 λ ,则合成的粗糙纹理表面 Z_X 为:

$$Z_X = \hat{Z}_R + \lambda \cdot \hat{Z}_W \quad (9)$$

设最终模拟生成的粗糙纹理表面 Z_D 均值为 μ_D ,标准差为 δ_D ,则:

$$Z_D = (Z_X - \mu_X + \mu_D) \cdot \delta_D / \delta_R \quad (10)$$

式中: μ_X 和 μ_D 分别是粗糙纹理表面 Z_X 的均值、标准差。

粗糙纹理表面模拟生成的流程图如图1所示。

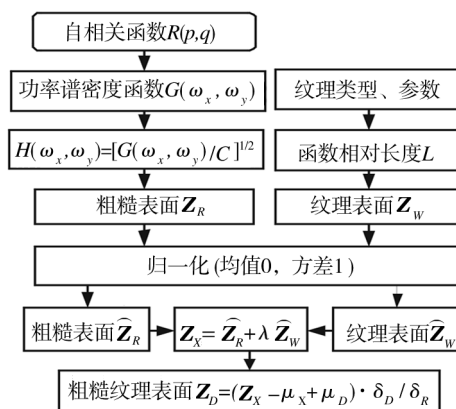


图1 粗糙纹理表面数字化模拟流程

Fig. 1 Flow chart of numerical simulation of rough texture surface

4 仿真分析

为验证本方法在实际工件粗糙纹理表面数字化模拟中的有效性,分别生成了不同相关长度的粗糙表面和不同纹理类型的纹理表面,然后进行合成处理,得到了一组粗糙纹理表面。

在粗糙表面的模拟中,本文选用粗糙表面模拟中常用的自相关函数:

$$R(x,y) = S_a^2 \cdot \exp[-2.3 \cdot \sqrt{(x/\beta_x)^2 + (y/\beta_y)^2}] \quad (11)$$

式中: S_a 是粗糙表面的标准差; β_x, β_y 分别是 x 和 y 方向上的自相关长度。模拟生成的相关长度 $\beta_x=3, \beta_y=3$ 的各向同性粗糙表面见图2a,相关长度 $\beta_x=30, \beta_y=3$ 的各向异性粗糙表面见图2b。

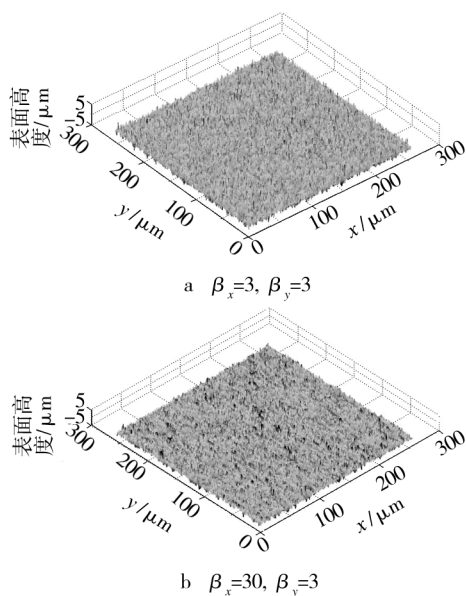


图2 模拟生成的粗糙表面

Fig. 2 The modeled rough surfaces

在纹理表面的模拟中,文中选用纹理周期为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的正弦曲线型纹理截面。模拟生成的中心点在 $(128, 128)$ 的圆环状纹理见图 3a, 偏斜角度为 0° 的条纹状纹理见图 3b。

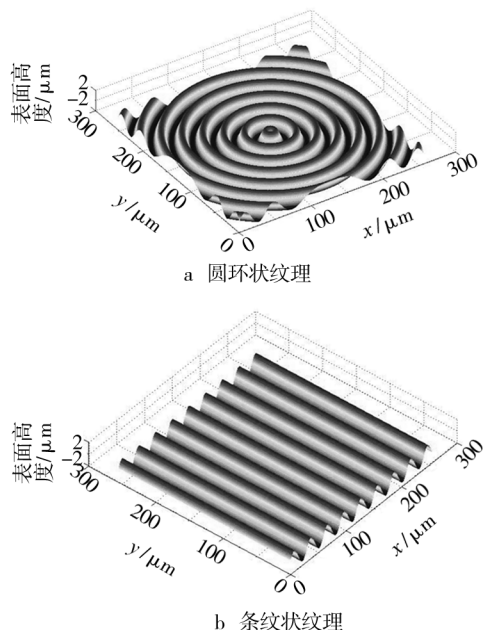


图3 模拟生成的纹理表面

Fig. 3 The modeled texture surface

将模拟生成的粗糙表面、纹理表面分别进行归一化处理,取比例因子 $\lambda = 0.6$,将相关长度 $\beta_x = 3, \beta_y = 3$ 的各向同性粗糙表面与圆环状纹理表面合成均值为 0、标准差为 1 的粗糙纹理表面,如图 4a 所示。将相关长度 $\beta_x = 30, \beta_y = 3$ 的各向异性粗糙表面与条纹状纹理表面合成均值为 0、标准差为 1 的粗糙纹理表面,如图 4b 所示。

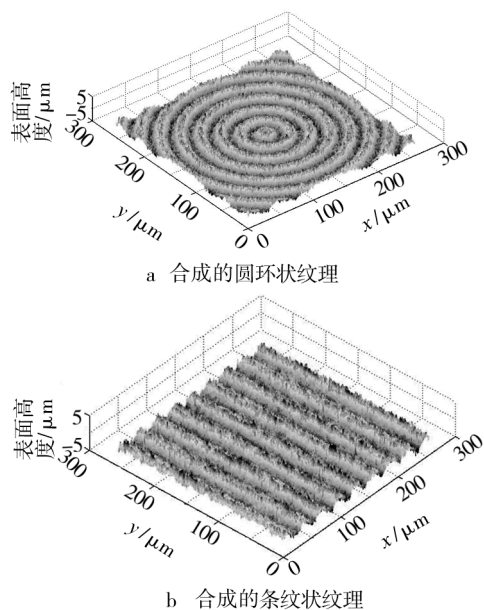


图4 模拟生成的粗糙纹理表面

Fig. 4 The modeled rough texture surfaces

实际工件受加工因素等的影响,表面形貌中周期性纹理成分和粗糙表面成分存在很大差异。文中提出的粗糙纹理表面模拟方法,能够通过设置不同的比例因子,控制合成表面形貌中周期性纹理表面成分和粗糙表面成分的大小,使模拟的粗糙纹理表面与实际工件的表面形貌更加接近,而将普通粗糙表面与纹理表面进行简单叠加,则无法控制不同成分的大小。

采用奥林巴斯 LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜对试件进行测量,得到的粗糙表面形貌如图 5 所示。将模拟粗糙表面(图 4b)与图 5 进行对比可以看出,本方法模拟生成的粗糙纹理表面能够较准确地模拟工件表面的形貌特征。

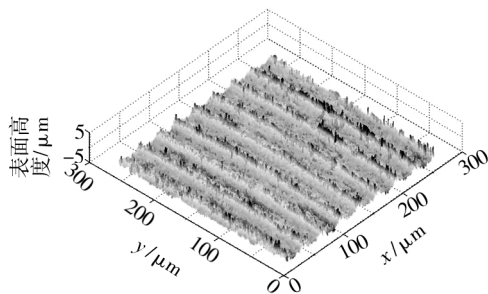


图5 实测粗糙表面形貌

Fig. 5 The measured rough surface

5 结语

为准确模拟具有周期纹理特征的粗糙表面,通过对分别模拟生成的粗糙表面和纹理表面进行合成处理,得到不同类型的粗糙表面形貌。该模拟方法只针对

(下转第 97 页)

表 2 在空白海水中浸泡后的 EDS 测试结果
Tab.2 The results of EDS of metal surface
after soaking in blak sea-water

元素	原子数分数 /%	质量分数 /%	化合物	化合物质量 分数/%
Al-k	1.90	1.66	Al ₂ O ₃	3.15
Si-k	2.10	1.92	SiO ₂	4.09
Cl-k	0.90	0.90	Cl	0.90
K-k	0.10	0.11	K ₂ O	0.14
Ca-k	0.80	1.07	CaO	1.47
Mn-k	0.32	0.57	MnO	0.72
Fe-k	35.60	64.46	Fe ₂ O ₃	92.15
O-k	58.28	29.31		

表 3 在添加四元缓蚀剂的海水中浸泡后的 EDS 测试结果
Tab.3 Test results of EDS with quaternionic inhibitor
after soaking in seawater

元素	原子数分数 /%	质量分数 /%	化合物	化合物质量 分数/%
Al-k	1.70	1.50	Al ₂ O ₃	2.89
Si-k	1.67	1.52	SiO ₂	3.96
Cl-k	0.02	0.02	Cl	0.02
K-k	0.08	0.09	K ₂ O	0.11
Ca-k	0.06	0.08	CaO	0.19
Mn-k	0.25	0.41	MnO	0.56
Fe-k	34.85	63.08	Fe ₂ O ₃	90.59
Zn-k	0.05	0.10	ZnO	0.13
W-k	0.22	1.23	WO ₃	1.55
O-k	61.10	31.97		

3 结论

1) 当钨酸盐质量浓度低于 40 mg/L 时, Q235 钢表面形成了氧化膜,但是不致密,有一定的部位处于裸露状态,从而形成局部“活化-钝化”电池,所以加速了碳钢的腐蚀;钨酸盐质量浓度≥40 mg/L 时,表现出缓

蚀性。
2) 四元钨系缓蚀剂的较佳配方如下:钨酸盐和葡萄糖酸钠质量浓度为 40 mg/L,Zn²⁺ 质量浓度为 4 mg/L,三乙醇胺质量浓度为 30 mg/L。此配方的复配缓蚀剂在天然海水中对 Q235 钢的缓蚀率可达 90.2%。
3) 此缓蚀剂体系为以抑制阳极为主的阳极型缓蚀剂。加入缓蚀剂后,碳钢表面增加了 Zn 和 W 等元素,而且 Cl⁻ 的含量明显降低,这可能是缓蚀剂分子与 Cl⁻ 在碳钢表面竞争吸附的结果。

[参 考 文 献]

[1] 邵丽艳,周玉波,李言涛,等. 绿色海水缓蚀剂的研究进展[J]. 海洋科学,2005,29(7):84—86.
[2] 杨朝晖,王庆璋. 海水介质中碳钢缓蚀剂的研究[J]. 海洋科学,1998(1):62—64.
[3] 陆柱,李燕. 钨酸盐与聚天冬氨酸对碳钢协同缓蚀作用的研究[J]. 腐蚀与防护,2001,22(9):371—374.
[4] 李清. 低磷阻垢缓蚀剂的试验研究与工业应用[J]. 工业水处理,2011,31(3):88—90.
[5] 陈博武. 无磷循环冷却水处理药剂的研究与开发[J]. 石油化工技术与经济,2011,21(1):28—32.
[6] ROBERTSON W D. Molybdate and Tung State as Corrosion Inhibitors and the Mechanism of Inhibition[J]. J Electrochem Soc,1951,98(3):94—99.
[7] 李燕,陆柱. 钨酸盐缓蚀机理的研究进展[J]. 材料保护,2000,33(11):29—31.
[8] 徐仲斌,张天红. 有关锌盐缓蚀剂的进一步探讨[J]. 腐蚀与防护,2000,21(9):398—401.
[9] 俞敦义. 钨酸钠与醇胺的协同作用[J]. 化工腐蚀与防护,1990,18(4):16—21.
[10] 王督,张辉,黄志宇. 有机膦酸类缓蚀剂和磷酸二氢锌复配体系的效果评价[J]. 精细石油化工进展,2005,2(2):28—30.

(上接第 90 页)

表面形貌中的一种特定类型,但实际上受加工因素等的影响,表面形貌可能存在凹坑、划痕、裂纹等各种类型的奇异特征,需进行进一步的深入研究,使模拟的粗糙表面形貌更加符合实际。

[参 考 文 献]

[1] WU Jiunn-jong. Simulation of Rough Surfaces with FFT[J]. Tribology International,2000,33:47—58.
[2] WU Jiunn-jong. Simulation of Non-gaussian Surfaces with FFT[J]. Tribology International,2004,37:339—346.

[3] PAWLUS Pawel. Simulation of Stratified Surface Topographies[J]. Wear,2008,264:457—463.
[4] REIZER R. Simulation of 3D Gaussian Surface Topography Wear,2011,271:539—543.
[5] 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,2009,21(10):2840—2842.
[6] 陈辉,胡元中,王慧,等. 粗糙表面计算机模拟[J]. 润滑与密封,2006(10):52—55.
[7] 宋俊杰,田爱玲. 非高斯随机粗糙表面计算机仿真的研究[J]. 计算机仿真,2008,25(6):308—311.