

文章编号:1000-582X(2006)11-0010-04

# 三维 motif 方法及其对微观形貌的表征\*

李志强, 陈小安, 杨学恒, 韩贤武

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**采用分水岭算法得到三维粗糙度 motif. 提出最小面积选择原则对粗糙度 motif 进行初始合并, 去除被认为是噪音的非显著 motif. 通过溢出点面积阈值对粗糙度 motif 进行进一步的合并及多等级的分析, 同时采用高度判断标准以防止对含有公共显著峰的 2 个 motif 进行合并. 最后对扫描隧道显微镜所扫得的 C(100) 面进行分析, 得到了该表面的 motif 参数, 分析该表面的纹理, 展示了该方法的独到之处, 并对三维 motif 方法波动特性进行了分析.

**关键词:**三维 motif 方法; motif; 粗糙度; 波纹度

**中图分类号:** TG84

**文献标识码:** A

被国际标准组织采纳的 motif 方法 (motif method) (ISO 12085:1996) 是一种基于包络线的评价体系, 它以图形的方式对粗糙度和波纹度进行描述, 通过对随机轮廓的峰进行包络连接, 然后在此基础上计算粗糙度和波动参数的方法<sup>[1-2]</sup>. motif 法仅用 7 个参数和上包络线即可对表面性能进行评价, 它不仅简单, 而且适合于多种功能特性的评定.

目前的表面度量正由二维向三维转换, 因为三维表面度量相对二维表面度量有着更好的统计特性. 而工程表面的一些重要特性, 如表面摩擦、磨损及密封等都与三维表面的微观形貌有着密切的联系.

三维 motif 方法可直接描述形貌的峰、谷及其形成的沟、脉走向与分布情况, 这与只关注高度信息的传统表面评价方法形成鲜明对比. 目前各国科学家对三维 motif 方法也进行了研究, 研究提出的三维 motif 的定义和合并方法各不相同<sup>[2]</sup>. 文献[3]采用 Vincent 分水岭算法对 motif 方法进行三维推广. 以此方法得到的三维粗糙度完全符合二维的推广, 且此三维 motif 算法是目前最简单的. 然而文献[3]没有采用类似于二维方法中的最小和最大深度选择原则以消除噪声的影响, 同时在给基于面积判断标准的粗糙度 motif 合并方法时没有给出具体的合并操作方式. 因而文中针对这些情况对三维 motif 方法进行了研究和讨论, 并给出了实例分析.

## 1 二维 motif 方法

二维 motif 方法详见文献[1, 4]. motif 由轮廓中相邻的 2 个峰之间的基本轮廓组成, 包括粗糙度 motif 和波动度 motif 二种. 粗糙度 motif 由原始轮廓中相邻的两峰之间的轮廓组成 (见图 1); 波动 motif 的计算在求解了粗糙度 motif 之后进行, 通过对轮廓中一系列粗糙度 motif 的顶点进行连接得到一段包络线, 单个波动 motif 为这段包络线 2 个相邻的峰之间的轮廓.

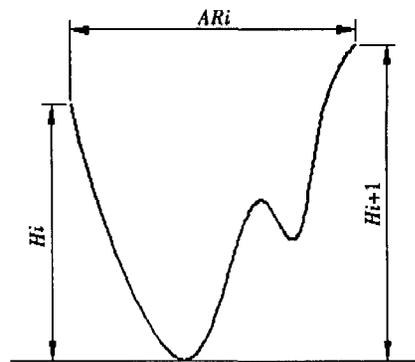


图 1 二维粗糙度 motif

在获得 motif 时需要预设 2 个阈值, 其作用是在进行不显著的 motif 合并的时候, 使得合并过后的粗糙度 motif 和波动 motif 的长度分别不超过这 2 个阈值且得到尽可能大的 motif.

\* 收稿日期: 2006-06-16

基金项目: “211 工程” 重点学科建设基础研究项目

作者简介: 李志强 (1982-), 男, 江西贵溪人, 重庆大学硕士研究生, 主要从事表面评价及测量方法的研究.

单个 motif 通过平行于轮廓的总走向长度  $AR$  (波动 motif 是  $AW$ )、垂直于基本轮廓总走向的 2 个深度  $H_i, H_{i+1}$  (波动 motif 为  $HW_i$  和  $HW_{i+1}$ ) 以及 motif 的深度  $R$  来表征(见图 1)。在取得每个 motif 的表征参数过后,对这些参数做平均处理得到这段取样轮廓的 motif 参数(见表 1)。

表 1 标准化的二维 motif 方法参数

	原始轮廓	粗糙度参数	波动参数
轮廓总高	$P_i$		$W_L$
motif 的平均深度		$R$	$W$
motif 的最大深度		$RX$	$WX$
motif 的平均间距		$AR$	$AW$

## 2 三维 motif 的定义及求解算法

### 2.1 分水岭算法

分水岭方法首先被应用在地形学上,它将一幅 256 级灰度图像的灰度值看作高度,而分水岭是围绕在一块灰度值较低区域的连续线,被包围的区域就是集水盆地(见图 2)。

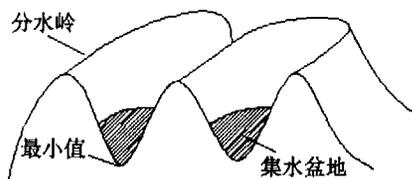


图 2 集水盆地和分水岭示意图

最著名的分水岭算法之一为 Vincent 开发出的算法<sup>[5-6]</sup>,其最大的优点是其较快的计算速度。此算法计算分水岭的过程可以比喻成一个渗水的过程:在以灰度值代表的高度形貌体的各个区域最低点打孔以便水渗入,后将慢慢地浸入水中;在不断的浸入过程中由不同孔渗入的水将相会,通过在相会的地方筑坝以阻止其相会;当形貌体完全浸入水中后,各个孔将被连续的坝包围,被包围的区域为集水盆地,建坝的地方为分水岭。

如图 3(a)所示,原始的灰度图像只含有 0 和 255 两种灰度,那么灰度为 0 的黑色区域代表着地貌的最低点。对此灰度图所代表的地貌采用分水岭算法可以得到图 3(b)所示的分水岭线,每个代表区域最低点的黑色区域都被分水岭完全包围着。

### 2.2 三维 motif 的定义

将 Vincent 分水岭算法用作三维 motif 的提取方

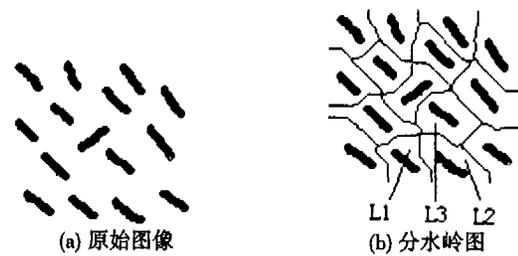


图 3 计算分水岭的不同阶段

法,被分水岭包围的各个独立区域即为三维 motif。如图 3(b)所示,编号为 L1、L2 的集水盆地分别代表不同的 motif。而 motif 与 motif 之间就是分水岭线,它很细不占任何面积。分水岭上的点相对于二维 motif 方法中的粗糙度 motif 峰值点,对这些峰值点进行一定的包络将得到三维波纹度 motif。所得到的三维 motif 完全符合二维的推广,因为采用一个垂直于轮廓表面测量基准面的平面沿任意方向切割此三维 motif 时都可以得到完全符合定义的二维粗糙度 motif。

### 2.3 三维 motif 方法的评定参数

由对二维 motif 方法的介绍可知,motif 方法包括粗糙度参数和波动参数 2 种。分水岭方法在原始数据的基础上得到的是粗糙度 motif,由于目前没有实现对波纹度三维 motif 的获得,因此这里只介绍粗糙 motif 参数;但是由于 2 种参数都具有类似性,在此介绍粗糙度参数同样可以用做波动参数。

#### 1) motif 的平均深度 $Sh$

$Sh$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 深度  $Sh_i$  的平均值。 $Sh_i$  是指这个 motif 分水岭的平均高度与该 motif 最低点高度之差。

#### 2) motif 的平均长度 $Sl$

$Sl$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 长度  $Sl_i$  的平均值。把 motif 投影到测量基准面上, $Sl_i$  是指此投影两个边缘点之间的最长距离(见图 4)。

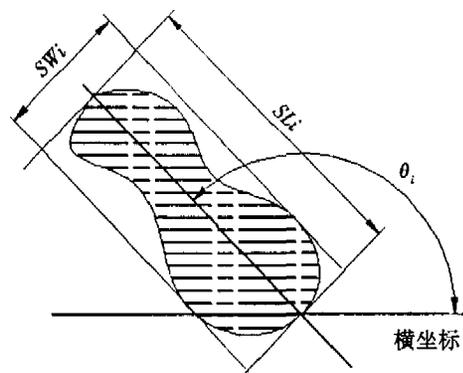


图 4 三维 motif 的长度、宽度和角度示意图

#### 3) motif 的宽度 $Sw$

$Sw$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 宽度

$Sw_i$  的平均值.  $Sw_i$  在计算 motif 长度的基础上再定义, 首先连接计算长度的那两个边缘点得到一个轴, 再作这个轴的垂线, 单个三维 motif 的宽度  $Sw_i$  是将此 motif 投影到这条垂线上得到了线段长度(见图 4).

#### 4) 单个三维 motif 的方向 $\theta_i$

单个三维 motif 的方向  $\theta_i$  同样也是在计算 motif 长度的基础上再定义, 它是指整个评价表面的横坐标与投影的长度轴的夹角(见图 4), 范围为  $[0, \pi)$ .

#### 5) motif 的平均面积 $S_s$

$S_s$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 面积  $S_{s_i}$  的平均值.  $S_{s_i}$  是指被分水岭包围的各单个集水盆地的面积.

#### 6) motif 的平均溢出点面积 $A$

$A$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 面积  $A_i$  的平均值.  $A_i$  为 motif 低于溢出点高度的所有区域投影到测量基准面上的面积之和, 其中 motif 的溢出点就是围绕在一个 motif 周围的分水岭的最低点. 溢出点面积从一定的角度反应了一个 motif 的储水能力.

#### 7) motif 的平均半径不均衡率 $S_r$

$S_r$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 宽度  $Sr_i$  的平均值.  $Sr_i$  是反映 motif 的形状方面的指标,  $Sr_i = \frac{(Sl_i - Sw_i)}{Sl_i}$ . 它表示 motif 是趋于圆形还是长形, 如果  $Sr_i$  趋于零说明此 motif 比较圆整, 反之则比较瘦长.

#### 8) 单个 motif 的扁平系数 $S_f$

$S_f$  为这个评价表面中所有单个三维 motif 宽度  $Sf_i$  的平均值.  $Sf_i$  同样也是反映 motif 的形状方面的指

标,  $Sf_i = \sqrt{\frac{Ss_i}{\pi}} / Sh_i$ . 它反映 motif 是趋于扁平还是突兀, 如果  $Sf_i$  比较大说明该 motif 比较扁平, 反之则比较突兀.

### 2.4 最小面积选择原则

用 Vincent 算法获得 motif 的很大一个缺点是在一些情况下很难得到显著的 motif, 容易造成集水盆地的过度分割, 其中很大一部分原因由于是噪声的影响<sup>[5]</sup>. 在二维方法中, 为了消除噪声的影响采用了最小和最大深度原则的峰谷选用原则. 由于高频噪声比较尖锐, 所以采用最小面积选择原则来消除面积较小的 motif, 将面积小于一定值的 motif 与其它 motif 合并. 具体的操作方法为: 对由分水岭方法得到的各个初始 motif 的面积进行计算, 将面积小于 motif 平均溢出点面积  $A$  的 5% 的 motif  $m$  与其它 motif 进行合并. 当然, 这里的 5% 是完全按照二维方法中最小深度选择原则

取的.  $m$  可能被其它很多 motif 包围着(如图 3(c) 的集水盆地 L3 的情况), 需要判别将  $m$  与哪个 motif 合并. 根据集水盆的定义, 我们的标准是  $m$  的溢出点与哪个 motif 相邻, 那么就把合并到这个 motif 中.

### 2.5 多尺度分析原则

文献[3, 7]未采用类似文中所提出的最小面积选择原则而直接采用了不同面积阈值对 motif 进行合并以进行多尺度的分析. 笔者采纳了多尺度分析方法并添加了一个限制条件, 2 个条件需皆满足才能进行合并操作, 具体如下:

#### 1) 面积条件

给定一个面积值  $\Delta$ , 如果评价表面中的单个 motif  $n$  的面积  $A_i$  小于  $\Delta$ , 则考虑将其并入其它 motif 中以得到更大的 motif.

这个条件是文献[3, 7]提出的, 但文献中未给出合并的具体操作方法. 采用与最小面积选择原则一致的方法, 即  $n$  的溢出点与哪个 motif 相邻, 那么就把合并到这个 motif 中.

#### 2) 高度条件

2 个 motif 合并后产生的新 motif 深度  $Sh$  不能低于原来 2 个 motif 的深度中任何一个的 1.1 倍. 如低于此则不能进行合并. 提出此方法是防止拥有显著公共峰(海拔高的公共分水岭)的 2 个 motif 合并. 当然对于不同的情况和需要, 1.1 这个倍数是可以改变的.

## 3 对有序碳(100)面的分析

### 3.1 多尺度分析

下面的分析所应用到的数据是利用扫描隧道显微镜采集得到的有序碳(100)表面高度的灰度图像, 其 0 灰度值代表的相对高度为 0 nm, 255 灰度值代表的相对高度为 0.223 nm, 扫描范围为 1 nm × 1 nm, 由灰度图可以大致地看出 C 原子(图 5(a)).

图 5(b)是采用最小面积选择原则得到的 114 个 motif, 从图中可以看出没有面积非常小的 motif 存在, 说明采用最小面积选择原则消除被认为是噪音的非显著 motif 是有效的.

三维方法没有类似与二维方法中的操作因子, 在未建立此方面的标准前采用多尺度进行分析. 当给定面积条件值  $\Delta = 0.0003 \text{ nm}^2$  进行合并后得到了 97 个 motifs(图 5(c)), 其三维 motif 参数见表 2.

图 5(d)是取面积条件值  $\Delta = 0.0077 \text{ nm}^2$  合并后得到的 27 个 motif. 从图中可以看出 motif 有明显的纹理, 这说明原子之间的谷地程一定方向分部.

由图 5(c)可以看出, 按  $\Delta = 0.0003 \text{ nm}^2$  进行合

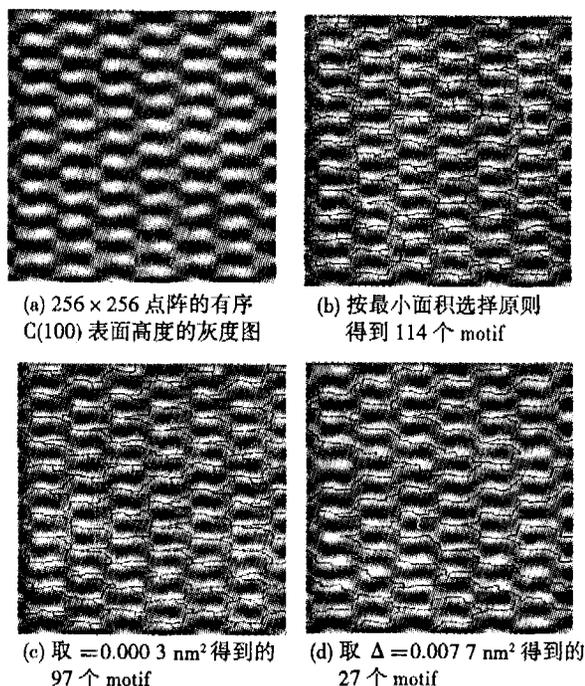


图5 由C(100)表面得到的 motif

并过后的大多数 motif 都是由 4 个原子中间的谷地构成的, 4 个原子间的平均谷地面积为 0.010 4; motif 的半径不平衡系数为 0.515 8, 这是因为碳(100)面原子并不是按矩形框架分布的, 所以 motif 的长度和宽度有一定的差距。

表2 取  $\Delta = 0.0003 \text{ nm}^2$  时三维 motif 的各个平均参数

平均深度 $Sh/\text{nm}$	0.092 3	平均角度 $\theta(^{\circ})$	96.202 5
平均长度 $Sl/\text{nm}$	0.188 4	平均宽度 $Sw/\text{nm}$	0.084 2
半径不平衡系数 $Sr$	0.515 8	扁平系数 $Sf$	1.200 8
平均面积 $Ss_i/\text{nm}^2$	0.010 4	平均溢出点面积 $A_1/\text{nm}^2$	0.003 7

### 3.2 纹理方向分析

表面纹理影响支承面积、泄漏率、摩擦、吸湿性和液体润滑<sup>[2]</sup>。现在对所有图 5(c) 和图 5(d) 的 motif 角度进行分析。图 5(c) 的所有 motif 角度分部直方图如图 6(a) 所示, motif 的角度分部在 5 度、80° 及 170° 左右, 最集中的 2 个区域为 5° 及 170° 左右, 在分水岭图中可以大致看出 motif 主要在这 2 个方向分部。图 5(d) 的 motif 角度分部直方图如图 6(b) 所示, 可以看出角度分部集中在 15° 和 155° 附近, 在分水岭图中也可以看出这 2 个主要的分部方向。这种角度及纹理走向分析是传统的表面分析方法所不具备的, 可以采用此方法对具有纹理的加工表面(如车削)进行分析, 可以得到加工纹理的分部方向。

### 3.3 关于波动 motif 的讨论

对三维采样数据进行 motif 粗糙度参数计算是相

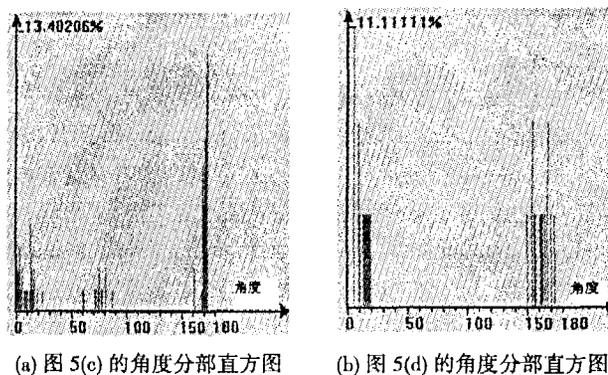


图6 角度分部直方图

对比容易实现的, 但是波动参数的计算就显得比较困难了。文献[3,7]提出将粗糙度 motif 进行合并所得到的较大的 motif 就是波动 motif。但是这种定义不符合二维波动 motif 的定义, 因为它没有把所有显著粗糙度 motif 的分水岭点考虑进去。文献[8]中通过最小曲线方法将粗糙度 motif 的分水岭上的点拟合成矩形网格点的方法得到波动包络面, 并在此基础上得到波动 motif。但文献[8]中没有具体介绍怎么对分水岭上的点进行拟合。按照二维方法的定义, 波动 motif 是对粗糙度 motif 的各个顶点进行包络。那么三维的波动 motif 也应该对所有粗糙度 motif 的分水岭上的点进行曲面拟合, 但是因为单个粗糙度 motif 分水岭上点的高度值的起伏幅度可能很大, 直接将这些点进行曲面拟合很可能得不到满意的结果, 因此在分水岭上按什么原则取曲面拟合点是件非常重要的事情。对于上面所作的原子表面分析, 波动曲面应该是对包围着每个粗糙度 motif 的 4 个原子的顶点(也就是每个 motif 分水岭的区域最高点)进行曲面拟合; 但对于其它的情况怎样进行拟合还须进一步的研究。

## 4 结论

将采用 Vincent 分水岭的算法得到的不同的集水盆地定义为三维 motif。采用最小面积选择原则以去除被认为是噪音的小面积 motif, 得到了较满意的结果。由于目前三维 motif 方法还在发展中, 没有类似于二维方法中的操作因子, 通过采用多尺度分析可以满足多种分析要求。

对有序碳(100)面的分析采用了多尺度分析原则, 通过不断增加  $\Delta$  值发现粗糙度 motif 显现出明显的纹理。三维 motif 方法对角度及纹理走向分析是传统的表面分析方法所不具备的。

致谢: 感谢重庆大学纳米工作站为本文提供扫描数据。

## 参考文献:

- [1] ISO 12085, 1996 Geometrical Product Specification (GPS)-Surface Texture: Profile method-Motif Parameters[S]. 1996.
- [2] 杨练根, 谢铁邦, 蒋向前, 等. 表面形貌的 Motif 评定方法及其发展[J]. 中国机械工程, 2002, 21(3): 1 862-1 865.
- [3] FRE' DE' RIQUE BARRE', JACQUES LOPEZ. Watershed Lines and Catchment Basins: a New 3D-motif Method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1 171-1 184.
- [4] DIETZSCH M, PAPPENFUß K, HARTMANN T. The Motif method-a Suitable Description for Functional, Manufacturing and Metrological Requirements[J]. Int. J. Mach. Tools Manufact, 1998, 38 (5-6): 625- 632.
- [5] VINCENT L, SOILLE L. Watersheds in Digital Spaces: an Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations, IEEE Trans[J]. Pattern Anal. Machine Intell, 1991, 13 (6): 583-598.
- [6] CHIEN SHAO-YI, HUANG YU-WEN, CHEN LIANG-GEE. Predictive Watershed; A Fast Watershed Algorithm for Video Segmentation[J]. IEEE Transactions On Circuits and Systems For Video Technology, 2003, 13(5): 453-461.
- [7] BARRE' F, LOPEZ J. On a 3D Extension of the MOTIF Method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41: 1 873-1 880.
- [8] MEZGHANIA S, b, ZAHOUANIA H, B. Characterisation of the 3D Waviness and Roughness Motifs[J]. Wear, 2004, 257: 1 250-1 256.

## 3D-MOTIF Method and Its Application to Microscale Topography

*LI Zhi-qiang, CHEN Xiao-an, YANG Xue-heng, HAN Xian-wu*

(State key laboratory of mechanical transmission, ChongQing University, ChongQing, 400030, China)

**Abstract:** The 2D motif method is a surface characterization method promising to separate roughness and waviness from a profile and is adopted by ISO, so is meaningful to extend this method to 3D. Vincent's watershed algorithm is employed for the generation of 3D-motif. A smallest area selecting criteria is proposed for the use of clearing the small motifs which are concerned as noise. As there are no manipulating factors as 2D-method, a multi-scale analysis is employed based on area and depth criteria, the use of depth criteria is to prevent the combination of two adjacent motifs if there is a significant peak on the border of them. Finally the surface of C(100) are analyzed by the presented method, the texture of this surface has been characterized.

**Key word:** 3D-motif; motif; roughness; waviness

(编辑 陈移峰)