

一种 3D - Motif 方法对工件磨痕 三维形貌的表征^{*}

黄长辉¹, 邹文栋¹, 颜乐先¹, 肖新元²

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 2. 江西机电职业技术学院, 南昌 330063)

摘要:论述了一种新的 3D - Motif 方法, 此方法是定义、基本表征参数与合并算法的结合. 对于分水岭算法得到最初三维粗糙度 Motif 的合并问题, 提出了一种基于变化树基础上的区域合并算法. 利用该 3D - Motif 评定方法对白光相移干涉仪测量重建出的磨痕表面三维形貌进行特征数据提取及表征分析, 用 Motif 的深度、宽度、面积等 7 个参数对磨痕表面进行了参数表征及分析, 这将对微机械工件周期润滑预防提供更可靠的数据依据.

关键词:3D - Motif 方法; 磨痕; 区域合并算法; 三维形貌

中图分类号: TG84

文献标识码: A

文章编号: 1006 - 0707(2010)02 - 0086 - 04

随着现代科技与工业越来越向精密化发展, 对材料表面的评定要求也从以前的二维发展成现在的三维. Motif 评定方法的发展一样从二维走向三维^[1], 3D - Motif 评定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. 由于目前学术界还没有统一的 3D - Motif 评定体系, 各国科学家对 3D - Motif 方法也进行了研究, 研究提出的 3D - Motif 的定义和合并方法各不相同^[2-5]. 对于采用分水岭算法得到的最初三维粗糙度 Motif 出现的过多无意义 Motif 区域, 本文中在 P. J. Scott 提出的变化树概念^[6]基础上提出了一种基于阈值的动态邻接表区域合并算法, 再结合 Barré 的参数定义^[4], 给出了一套新的 3D - Motif 评定体系, 并针对 Q235 碳钢材料由磨粒磨损导致磨痕痕迹进行了实例分析.

1 3D - Motif 表征法

3D - Motif 定义是基于地貌学提出的, 一个 3D - Motif 为由分水岭包围的集水盆.

1.1 分水岭算法

分水岭 (Watershed)^[7] 比较经典的计算方法是 L. Vincent 提出的. 分水岭的描述如图 1 所示.

此算法计算分水岭的过程可以通过模拟浸入过程来说明. 在每一个局部极小值表面, 刺穿一个小孔, 然后把整个模型慢慢浸入水中, 随着浸入的加深, 每一个局部极小

值的影响域慢慢向外扩展, 在 2 个聚水盆汇合处构筑大坝, 即形成分水岭.

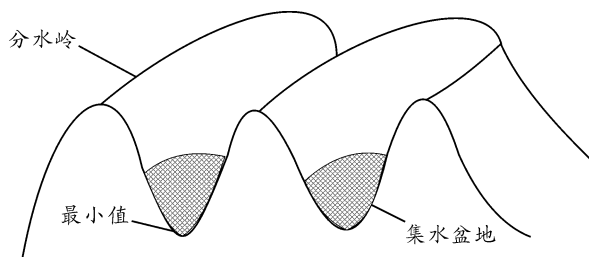


图 1 分水岭的形成

1.2 评价参数定义

本文中的参数定义采用 Barré 的参数定义. Barré 从二维 Motif 标准出发, 给出了三维 Motif 的特征化参数, Motif 集合的第 i 个 Motif 的参数为:

1) Motif 的深度 h_i , 包围该 3 维 Motif 的分水线的平均高度与最小高度的差;

2) Motif 的面积 S_i , $P_i = (x_i, y_i, z_i)$, 由分水线 (P_1, P_2, \dots, P_n) 所包围的一个 3 维 Motif 的面积

$$S_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n x_j (y_{j+1} - y_{j-1}) \quad (1)$$

$$y_{n+1} = y_1, y_0 = y_n \quad (2)$$

3) Motif 的宽度 W_i 在分水线平面上, 沿垂直于 Motif 的主惯性轴方向所得的最大宽度;

4) Motif 的长度 l_i , 在分水线平面上, 沿平行于 Motif

* 收稿日期: 2009 - 11 - 29

基金项目: 航空科学基金资助 (20085656018).

作者简介: 黄长辉 (1985 -), 男, 硕士研究生, 主要从事白光显微干涉测量技术.

的主惯性轴方向所得的最大长度;

5) Motif 的方位角度 θ_i , 主惯性轴与横坐标轴的夹角, 在 $[0, \pi]$ 内;

6) 各向异性率 r_i ,

$$r_i = (l_i - w_i) / l_i \quad (3)$$

它表示 Motif 是趋于圆形还是长形, 如果 r_i 趋于零, 说明此 Motif 比较圆整, 反之则比较瘦长;

7) 平坦系数 f_i ,

$$f_i = w_i / h_i \quad (4)$$

它反映 Motif 是趋于扁平还是突兀, 如果 f_i 比较大说明该 Motif 比较扁平, 反之则比较突兀。

1.3 区域合并算法

分水岭算法虽然能够很好地提取出磨痕表面的特征出来, 但此算法对其微弱边缘信号也具有有良好的响应, 因此采用分水岭算法进行表面三维特征信息提取时, 通常会产生过度分割的现象, 从而产生很多无意义的 Motif 区域. 使得表面三维特征信息不能够很好地表征出来, 针对此过度分割产生的无意义区域, 本文中在变化树的基础上提出一种区域合并的算法使其对无意义区域合并, 这样磨痕表面三维特征信息就能很好地被提取及表征出来。

先对分水岭算法分割好的每个分水岭区域标号, 并计算出其面积; 接着找出面积最小区域并对其进行谷底 (pit)、鞍点 (saddle point) 建立其谷地变化树, 在变化树上找出离面积最小区域谷点最近的鞍点, 并根据此鞍点找到属于面积最小区域之外的区域 (最小面积区域的相邻区域), 看这 2 区域面积是否在设定阈值面积范围内, 符合则合并, 合并后再重新区域标号, 重复上面过程直到超出设定阈值; 不同的面积阈值将得到不一样的 motif 区域数目。

在此描述下区域邻接图 (RAG, region adjacency graph) 概念^[8]. 如图 2 a) 中所示分割图像 5 个区域之间的关系可用如图 2 b) 中区域邻接图表示. RAG 可定义为 $G = (V, E)$, 其中 $V = \{1, 2, \dots, K\}$, 表示 K 个区域标号, 每个标号代表一个区域; $E \subset V \times V$ 表示 RAG 每条边 (或弧), 边 (或弧) 的权重表示 2 个区域之间的差异度, 定义区域面积 $\delta_i = |S_i|, i \in V$. 区域合并的过程就是 RAG 顶点合并同时进行相应数据更新的过程。

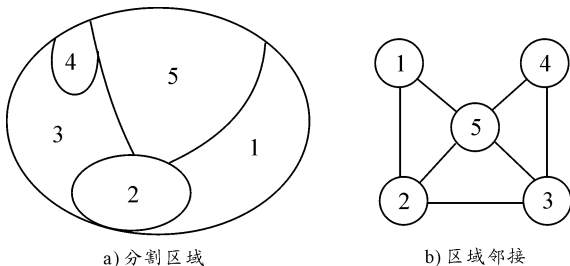


图 2 分割图像及其对应的区域邻接图

先设定阈值 $T1$, 具体的合并算法实现步骤为:

1) 输入分割好的区域邻接图 (RAG);

2) 刚开始寻找到面积最小的 δ_{\min} 与及标号 i , 以后就是

寻找 δ_i 及相应标号 i ;

3) 对所找到区域 i 的谷底、鞍点, 对它们建立其谷地变化树关系, 找出离区域 i 谷点最近的鞍点, 根据此鞍点找到属于区域 i 之外的区域 j (标号);

4) 对 i 区域与 j 进行区域合并;

5) 调整区域邻接图 (RAG);

6) 对已处理标号 i 的面积 $\delta_i + 1$; 返回 2), 直到当前区域面积值 $\delta_i > T1$;

7) 输出轮廓图像。

2 实验

实验选用的材料: 在工业领域中约占 50%、引起损失及破坏最为严重的磨粒磨损 Q235 碳钢工件材料. 本实验中就是利用白光干涉系统和驱动电源组成的闭环 PZT 微纳定位扫描系统对磨损痕迹的干涉图进行一系列连续不间断的采集, 并利用空间频域算法^[9-10]对采集到的干涉图进行处理, 以此重建出 Q235 碳钢材料由磨粒磨损导致磨损痕迹的三维原貌图. 图 3 为实验中用自行设计的闭环微纳定位扫描系统测得的磨损痕迹工件表面的干涉图, 工件磨痕的测量范围为 $0.2032 \text{ mm} \times 0.2032 \text{ mm}$.

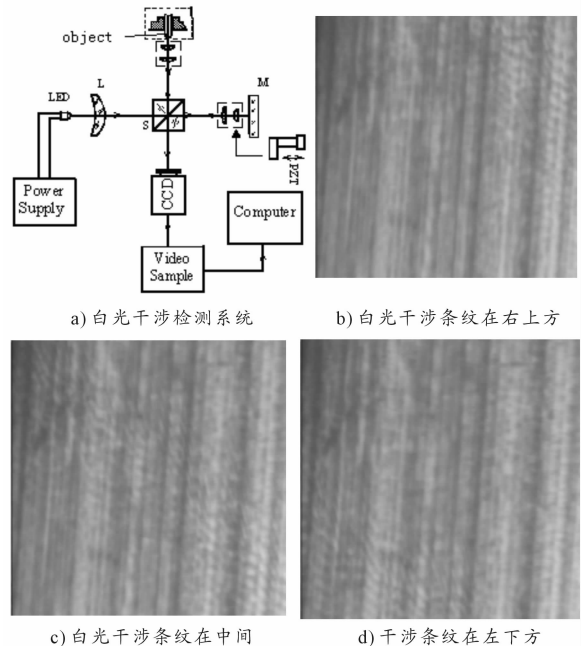


图 3 白光干涉检测扫描图

从图 3 中可以清楚地看到白光干涉条纹所扫描在磨痕表面的不同位置, 干涉系统对测量表面不同位置扫面可以得到一系列连续干涉图, 再根据空间频域算法重建出其三维原貌图. 图 3 b)、c)、d) 只是此系列图中的 3 幅, 图 4 就是重建出来的三维原貌。

由图 4 的三维原貌信息就可以对磨痕表面进行三维表征分析, 这样就可以实现对磨痕表面从二维分析转向更

好的三维定量分析.

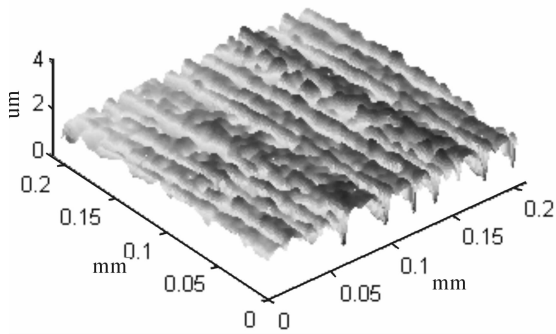


图4 磨痕表面三维原貌

3 3D - Motif 表征分析

由磨痕表面三维原貌的重建可以提取出三维信息,下面就可以对这些特征信息进行三维 Motif 分析,首先直接采用默认最小面积 $\Delta = 4.4812 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$ 选择原则,得到 334 个 Motif 区域,见图 5 a),从该图中可以看出有非常多无意识的 Motif 区域存在.再利用阈值动态邻接表区域合并算法,取阈值 $\Delta = 4.8640 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ 进行合并后,得到 222 个 Motif(图 5 b)),取阈值 $\Delta = 1.5424 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ 进行合并后,得到 89 个 Motif(图 5 c)),取阈值 $\Delta = 1.0121 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 进行合并后,得到 13 个 Motif(图 5 d)),图 6 是对图 5 a)做 Motif 区域方向的分布,从图 6 中可以得出磨损痕迹具有一定方向性,相对集中在 0° 和 $\pm 90^\circ$ 附近.其中纵坐标表示与 Motif 区域具有相同标准二阶中心矩的椭圆的长轴与 x 轴的交角(度),横坐标表示各个 Motif 区域中数据点个数.

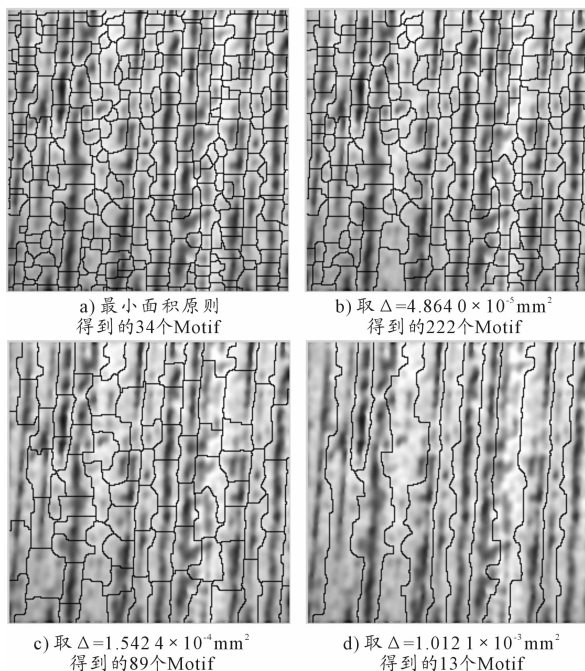


图5 由磨痕表面得到的 Motif

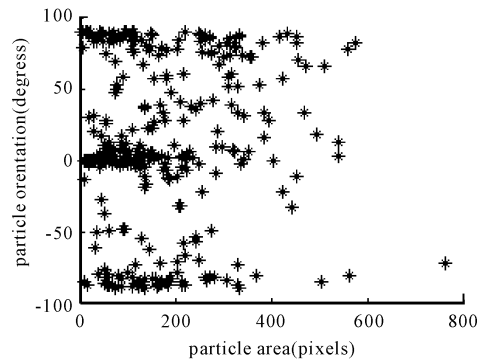


图6 Motif 区域的方向—面积

从图 5 c)、d)中可以看出 Motif 有明显的纹理性,这进一步说明磨损痕迹具有一定方向性.表 1 是选取阈值面积 $\Delta = 1.5424 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ 得到的各向平均参数.

表1 $\Delta = 1.5424 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ 三维 motif 的各个平均参数

平均深度 \bar{h}/um	0.465 3	平均宽度 w/um	0.016 8
平均长度 \bar{l}/um	0.036 3	平均角度 $\theta/(\circ)$	73.496 9
平均面积 S/um^2	4.25×10^{-4}	平均平坦系数 f	36.105 7
平均各向异性率 r	0.537 8		

表 1 的 Motif 参数就是设定的阈值面积 $\Delta = 1.5424 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$,对磨痕表面三维信息进行提取、处理得到具体的三维特征定量分析数据,表 1 中的平均角度可以说明图 5 c)的 Motif 的方向总体趋近于 73° . Motif 的各向异性率为 0.538 7,这是因为每条磨痕的长度和宽度有一定的差距. Motif 的平坦系数为 36.105 7,这说明了 Motif 非常扁平.

在特征尺寸达到微米甚至纳米量级的微机械表面摩擦副中,要求相应量级的润滑薄膜起到减磨、耐磨作用,而这种特殊的润滑状态与宏观润滑膜性质不同,因此对微观形貌的评定研究提出了更高的要求.

4 结束语

由于 3D - Motif 评定方法目前没形成统一,本文中针对采用 Vincent 提出的分水岭算法进行 Motif 提取,出现过无意义 Motif 区域,在变化树(数学定义)的基础上提出了阈值动态邻接表区域合并算法.利用该 3D - Motif 方法对 Q235 碳钢材料磨痕表面进行了试验,从合并前后的 Motif 区域及表 1 对三维 Motif 的各个平均参数的表征,都可以看出具有较好的合并效果,此方法为微机械工件磨痕表面更加全面的粗糙度参数,这也为微机械工件周期润滑提供了更可靠的数据依据.

参考文献:

- [1] 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,2002,13(21): 1862 - 1865.

- [2] FRE'DE'R IQUE BARRE', JACQUES LOPEZ. Watershed Lines and Catchment Basins: a New 3D - motif Method[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40: 1171 - 1184.
- [3] CHIEN SHAO-YI, HUANG YU-WEN, CHEN L IANG-GEE. Predictive Watershed: A Fast Watershed Algorithm for Video Segmentation [J]. Ieee Transactions On circuits and Systems For Video Technology, 2003, 13(5): 4532461.
- [4] BARRE'F, LOPEZ j. On a 3D Extension of the MOTIF Method[J]. International Journal of Machine Tools & Manu)-facture, 2001, 41: 1873 - 1880.
- [5] MEZGHAN IA S, b, ZAHOUAN IA H, B. Characterisation of the 3D Waviness and Roughness Motifs[J]. Wear, 2004, 257: 1250 - 1256.
- [6] Paul J Scott. Foundations of topological characterization of surface texture [J]. Int J. Mach Tools Manufact, 1998, 38(5 - 6) : 559 - 566.
- [7] L Vincent, P Soille. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations, IEEE Trans[J]. Pattern Anal. Machine Intell. 1991, 13: 583 - 598.
- [8] Wu Xiaolin. Adaptive split-and-merge segmentation based on piecewise least-square approximation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(8): 808 - 815.
- [9] JACKOWSKIM, SATTERM, GOSHTASBYA. Approximating digital 3D shapes by rational Gaussian surfaces [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(1): 56 - 69.
- [10] Wendong Zou. A fast-Fourier-transform algorithm for surface profiler based on scanning white-light interferometry[C]//Proceedings of ICO-20 Conference. [S. l.] : [s. n.], 2005.

(责任编辑 陈松)

(上接第81页)分布情况来看,建议放弃安装天线的第1种配重方案,而在第2种配重方案的铝合金箱体前部第2与第3立柱间加电视墙骨架。

2) 从变形来看,最大变形发生在5~7立柱及相连接的顶部横梁,且垂向变形大。从整体厢体的变形形态看,属于简支梁形态,造成的原因主要是因为5~8区域的载荷大且集中度高。结构上应考虑顶部加贯通式纵向骨架,相应部位加侧向立柱,另外考虑在附近加骑马螺栓。

3) 行李架刚度普遍偏弱,侧向变形较大,建议加立柱和斜撑,以提高局部结构刚度。

提出改进建议后,根据改进建议修改了原结构。重新计算后得到,最大垂向位移减少了20%,应力变化不大。

参考文献:

- [1] 李德信,吕江涛,应锦春. SX360型自卸车车架有限元分析模型的建立及动静特性分析[J]. 机械科学与技术,2002, 21(3): 380 - 386.
- [2] 李德军,卜绍先,杨超英. 反“Z”型重型汽车车架的有限元分析[J]. 济南大学学报, 1994, 4(1): 66 - 68.
- [3] 苏庆,孙凌玉,刘福保. 运用CAE技术进行某微型客车车架结构的分析与优化设计[J]. 农业装备与车辆工程,2005(4): 26 - 32.
- [4] 桂良进,范子杰,陈宗渝,等. 长安之星微型客车车架刚度研究[J]. 汽车技术, 2003(6): 28 - 30.
- [5] 苏玉珍,李成,贾红雨,等. 某车型车架的有限元分析[J]. 机械设计与制造,2009(8): 46 - 48.
- [6] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社,2006.
- [7] 杜子学,李芹英,文孝霞. 全地形车车架结构的静动态分析[J]. 机械工程师,2006(12): 64 - 66.
- [8] 姜雷. 轨检车车架强度的有限元分析[J]. 铁道建筑, 2009(1): 12 - 14.
- [9] 罗明军,王文林,徐高新. 陆风X6车架有限元分析与结构优化[J]. 机械设计与制造,2009(8): 32 - 34.

(责任编辑 周江川)