

文章编号 1004-924X(2010)10-2314-10

应用 Canny 算法和灰度等高线的 金相组织封闭边缘提取

邓仕超¹, 刘铁根¹, 萧泽新²

(1. 天津大学 精仪学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:为了对金相组织的多项组织含量进行定量分析, 提出应用 Canny 算法和灰度等高线相结合的方法来产生封闭金相组织边缘。首先, 采用高斯函数对金相组织的灰度图像进行模糊处理, 然后, 用 Canny 算法对模糊后的图像获取具有单边缘效应的原始边缘。通过最大类间方差法对原始边缘进行自动计算, 获得抑制虚假边缘的阈值, 并通过该阈值获取基础边缘。由于基础边缘具有不连续性, 因此需根据基础边缘端点的邻域灰度中值计算所需的灰度等高线, 同时根据设定的等高线和基础边缘融合的条件, 以基础边缘的端点为起点生成封闭边缘。实验结果表明, 该算法可有效地生成符合要求的封闭边缘, 采用该算法产生的封闭边缘进行金相组织含量测定可使测量误差降低到 $\pm 1\%$, 可测组织含量范围达到 $5\% \sim 95\%$ 。该算法能满足多项金相组织含量测定的定量分析要求且具有普适性。

关键词:边缘检测; 封闭边缘; 图像分割; 金相组织; 灰度等高线; Canny 算法

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2314

Extraction of enclosing image edge for metallographic structure based on Canny and grayscale contour line

Deng Shi-chao¹, Liu Tie-gen¹, Xiao Ze-xin²

(1. Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical

Science of the Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-electronics

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Mechanical

& Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to quantitatively analyse the polyphase contents of metallographic structures, this paper presented an enclosing image edge extraction algorithm based on the Canny algorithm and a grayscale contour line. Firstly, the grayscale images of metallographic structure were blurred with Gaussian blur, and then the initial edges with single edge effect in blurred images were acquired using Canny algorithm. The thresholds were automatically calculated by the maximising variance between-class to reduce false edges and to obtain the basic edge for the next steps. According to the grayscale neighborhood of the end points of basic edge, the gray values of grayscale contour line were calculat-

收稿日期: 2010-01-08; **修订日期:** 2010-04-05.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2010CB327802); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60627002); 天津市应用基础重点项目 (No. 06YFJZJC00400); 教育部博士点新教师基金资助项目 (No. 200800561020)

ed. On the basis fusion conditions of basic edge and grayscale contour line, the closing edge could be created from the end points of basic edge. Experimental results indicate that this algorithm can generate an enclosing edge efficiently. The error rate of the polyphase contents of metallographic structures has decreased to $\pm 1\%$ by using this algorithm. The proportion range of different sections about one metallographic image has increased to 5%-95%. The algorithm can satisfy the demand of quantitative analysis of the polyphase structure contents and is suitable for different shape metallographic structures.

Key words: edge detection, enclosing edge, image segmentation, metallographic structure, grayscale contour line, Canny algorithm

1 引言

金相学是研究金属或合金内部结构的科学,主要研究外界条件(温度、加工变形、浇注情况等)或内在因素(金属或合金的化学成分)改变对金属或合金内部结构的影响。金属材料的很多性能主要取决于其化学成分和金相组织构成,因此可以按已知成分和组织预测金属材料的性能,反之亦然。目前应用较广的定量金相分析法是人工方法,一般采用 GB/T 13305-2008 中的标准图谱对比法测定双相比,其缺点是误差大($\pm 2.5\%$),判定含量范围小(35%~75%),对于不规则金相组织难以判定^[1];也有人采用计算机辅助网格交点计数法进行金相分析,该方法对比法准确性有提高,测量含量范围也更大^[2],但该方法效率较低,劳动强度大,且再现性略差。

近年来,不少学者利用计算机图像技术对金相组织识别和定量分析做了一系列的研究,并取得了一定进展。概括起来讲,对于多相组织识别的研究主要是根据金相组织的灰度、色度和形态特征,如燕惠芳^[3]根据灰度分割图像然后用模式识别进行金相组织识别;汤力琨^[4]采用分水岭算法分割图像;黄丽华^[5]通过彩色金相组织染色法制作样品,然后通过色度区分金相组织。这些研究均侧重于灰度特征和形态特征,适合进行定性分析,而对于多相组织的定量分析,由于金属材料具有不同相组织之间灰度重叠且形态多变的特点,所以难于对金相组织边缘进行准确划分,因此如何准确描述金相组织区域边缘是一个亟待解决的问题。

传统的边缘检测算法包括 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子等一阶微分算子,以及

Laplacian 算子、LOG 算子等二阶微分算子^[6]。通常,这类算子都以一阶导数极大值点或二阶导数过零点作为候选边缘点^[7],通过选取合适的阈值,从中提取图像边缘,具有简单、易于实现、运算速度快等优点,不过微分算子也具有对噪声较敏感的特点,因此抗干扰性能差,边缘不够精细^[8]。对于灰度多变的图像,也可以采用基于局部邻域灰度极值的边缘检测方法^[9]。Canny 于 1986 年提出了基于最优化算法的边缘检测算子^[10],并提出了一个好的边缘检测算子应该具有如下的 3 个准则:信噪比高、定位精度高和有单边缘响应。该算法具备较好的检测效果,迄今为止,依然是主要的边缘检测方法。然而,利用 Canny 进行检测边缘时,高、低阈值和高斯滤波参数都需要人为确定,因此使用 Canny 算子比较繁琐,并且不同的参数组合对产生的边缘有很大的影响^[11]。除了边缘检测算法,对图像进行二值化处理等形态学算法也可以获得区域边缘^[12]。

总而言之,现有各种获取边缘的算法各有优势,但是对于金相图像这一类具有形态多变,灰度重叠特征的图像而言,这些算法经常会出现虚假边缘或者边缘断裂等现象,这些现象会影响金相组织区域划分的准确性从而使定量分析产生较大误差。

为了获得准确完整的金相组织区域,本文采用 Canny 算法和灰度等高线相结合的算法生成封闭边缘曲线以分割不同的金相组织,该算法的优点在于利用 Canny 算法产生具有单边缘效应的基础边缘,并利用灰度等高线的封闭特性与基础边缘融合产生封闭边缘,从而分割出了不同的金相组织区域,为含量计算和组织识别提供了明确区域划分。

2 金相组织基础边缘提取

金相组织图像蕴含了方向、阶跃、形状等丰富的内在信息,边缘特征比较丰富;同时,由于金相显微镜的通光量和 CCD 或 CMOS 等感光设备的特性,不可避免地会产生噪声,因此直接采用一阶导数或者二阶导数产生基础边缘信息必然会受到噪声的感染,同时也很容易生成较粗的边缘,不适合下一步生成封闭边缘。由于 Canny 算法具有高信噪比和单边缘响应的特征,因此采用该算法来产生金相组织的基础边缘是合适的。

Canny 算法要求图像为灰度图像,可以采用灰度转换的经典式计算其灰度 d_{ij} :

$$d_{ij} = R_{ij} \times 0.11 + G_{ij} \times 0.59 + B_{ij} \times 0.30, \quad (1)$$

R_{ij} , G_{ij} 和 B_{ij} 为图像在 (i, j) 的 RGB 分量。金相组织的图像一般属于灰度图像,因此也可以直接采用任一 RGB 分量,其中以 G 分量最好。在某些检验要求下显微镜会加上不同的滤色镜,此时灰度值可以选用对应滤色镜的颜色。

Canny 算法步骤如下:

(1) 采用二维高斯函数对图像进行低通滤波,二维高斯函数为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

x, y 是图像某像素的邻域相对坐标。

用该函数与图像进行卷积获得平滑的图像 $I(i, j)$:

$$I(i, j) = G(x, y) * f(x, y), \quad (3)$$

* 为卷积, $f(x, y)$ 为图像在 (i, j) 坐标处相应邻域的灰度值。

(2) 对 $I(i, j)$ 采用 2×2 大小的模板计算 X 和 Y 方向偏微分的一阶近似 G_x 和 G_y , 并据此计算其梯度的大小 $M(i, j)$ 和梯度方向 $O(i, j)$:

$$G_x(i, j) = \frac{1}{2}(I(i, j-1) - I(i-1, j-1) + I(i, j) - I(i-1, j)), \quad (4)$$

$$G_y(i, j) = \frac{1}{2}(I(i, j-1) + I(i-1, j-1) - I(i, j) - I(i-1, j)), \quad (5)$$

$$M(i, j) = \sqrt{G_x(i, j)^2 + G_y(i, j)^2}, \quad (6)$$

$$O(i, j) = \arctan\left(\frac{G_y(i, j)}{G_x(i, j)}\right), \quad (7)$$

(3) 对式(6)产生的梯度幅值图像 $M(i, j)$ 进行非极大值抑制,其中梯度方向按 $O(i, j)$ 划分为图 1 所示 4 个值:

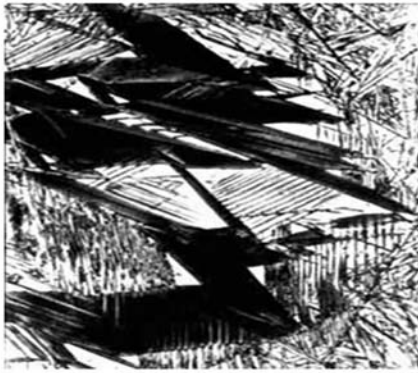
在 $M(i, j)$ 中以点 (i, j) 为中心的 3×3 的邻域内沿该点的梯度方向进行计算,若该点的梯度幅值不大于其梯度方向上与其相邻的两个点的梯度幅值,则将点 $M(i, j)$ 标记为非边缘点,也就是将该点置 0。这样,就得到了候选的基础边缘图像 $N(i, j)$ 。图 2 显示了利用 Canny 算法产生的金相组织图像基础边缘的过程,其中(c)就是获得的原始边缘图像 $N(i, j)$ 。

3	2	1
0	ij	0
1	2	3

图 1 8 邻域的 4 个方向及取值

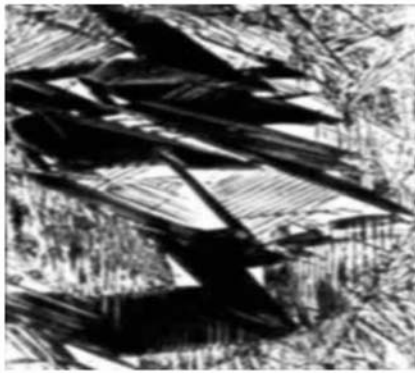
Fig. 1 Four direction values in 8 neighborhood

4) 从图 2 的(d)显示的边缘可以看到, Canny 算法产生的梯度边缘图像 $N(i, j)$ 灰度范围比较大,如果把所有非零的梯度看作边缘就会因此产生许多虚假边缘,所以 Canny 算法要求设定 2 个阈值 T_1 和 T_2 , 其中 $\max > T_2 > T_1 > 0$, 而大于 T_2 的边缘可以看作是必然的真实边缘,然后根据梯度值位于 T_1 和 T_2 的边缘对上述真实边缘进行延伸,以抑制虚假边缘。但采用该方法边缘端点的截止梯度会不一致,因此本文只采用一个分隔阈值。本文采用自动阈值门限计算方式获取 T , 采用最大类间方差法(OTSU)对梯度图像进行自动划分。由于原始图像已经采用高斯模糊,因此可以选用较低的阈值:对全部梯度值进行第一次阈值划分获得阈值 T ; 在梯度值 $\in [T, \min]$ 的范围内再作一次 OTSU 分割,产生阈值 T_2 。对于图 2(c), 将符合条件的梯度值改为 255, 不符合条件的边缘值置 0, 就得到图 2(e)显示的基础边缘。



(a) 马氏体和奥氏体的金相图像

(a) Metallographical image of martensite and austenite



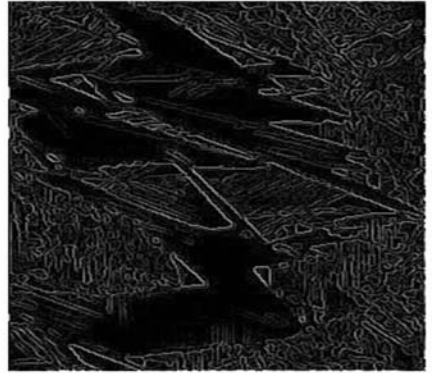
(b) 对(a)进行高斯平滑滤波的平滑图像

(b) Smooth image of Fig. (a) by Gaussian filtering



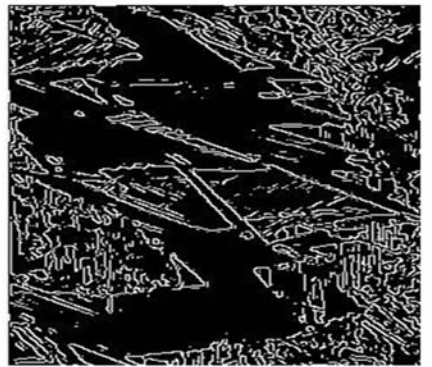
(c) Canny 算法产生的边缘图像

(c) Image edge of metallographical image created by Canny algorithm



(d) 为了便于观察对(c)进行了 2 倍灰度增强

(d) Enhanced gray image (2×) for (c)



(e) 通过阈值 T_2 获取的基础边缘

(e) Basic edge obtain by threshold T_2

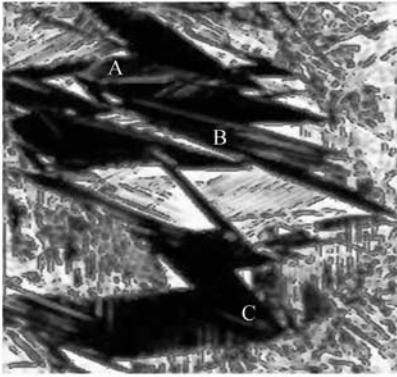
图 2 Canny 算法产生基础图像边缘的过程

Fig. 2 Process of basic image edge created by Canny algorithm

3 封闭边缘生成

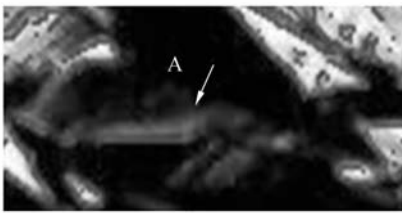
从图 3 可以看到, Canny 算法产生的最优化边缘对金相组织边缘描述准确, 但是由于边缘提取算法的特性, 对于灰度缓变区域很难产生令人满意的边缘, 因此提取的曲线往往是不闭合的, 而在金相图像中, 灰度缓变的区域是常见的。通常能产生封闭分割线的算法属于形态学的区域划分, 比如二值化算法和分水岭算法等。二值化算法对图像的分割往往会将对金相组织处于阈值附近过渡区域的灰度进行强化或湮灭, 造成定量计算的不准确; 分水岭算法产生的封闭区域线肯定出现在区域的最大灰度处, 因而对金相组织的划分是没有意义的。对于金相组织这一类灰度重叠造成划分困难的图像, 如果把灰度值看作地形图相

应的高度值,采用类似于地形图的等高线概念可以产生封闭的边缘。



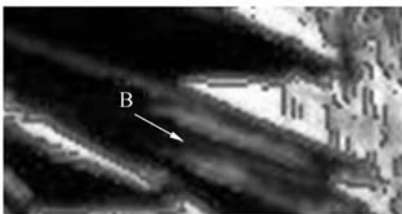
(a) 金相组织图像与基础边缘叠加图

(a) Overlay image of metallographical and basic edge



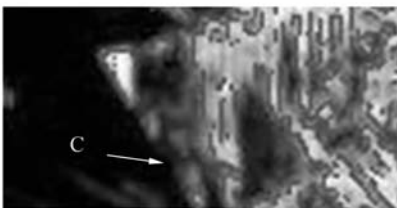
(b) 局部放大图

(b) Local detail with enlarged scale



(c) 局部放大图

(b) Local detail with enlarged scale



(d) 局部放大图

(b) Local detail with enlarged scale

图 3 (a) 金相组织图像与基础边缘的叠加图和局部放大图

Fig. 3 Overlay image of metallographical and basic edge and local details with enlarged scale of (a)

3.1 灰度等高线的封闭性

属于同一灰度等高线中的像素具有以下特征:该像素的 8 邻域中存在有高于(或低于)等高线灰度值 d 的像素,且该像素灰度小于等于(或高于等于)该等高线灰度值。当应用高于的定义时,可以称为较低等高线,反之,应用低于的定义时,可以称之为较高等高线,在同一次处理过程中应只采用较低等高线或较高等高线的两者之一,否则会引起混乱。本文一律采用较低灰度等高线定义进行计算,等高线的像素定义如图 4 所示。

166	233	200
211	89	192
189	134	110

(a) 符合较低等高线定义的像素

(a) Pixel fallen within definition of lower contour line

100	99	89
33	160	190
78	65	87

(b) 符合较高等高线定义的像素

(b) Pixel fallen within definition of higher contour line

图 4 $d=128$ 灰度等高线的像素

Fig. 4 Pixels of contour line with $d=128$

由定义可知,在灰度图像中,对于除单个像素的斑点或单像素宽度的线外的灰度区域,灰度等高线可以产生封闭的区域分割线。

3.2 基于基础边缘端点的等高线阈值划分

如前所述,边缘算法提取的边缘由于灰度值可能出现缓慢变化而不能保证连续和封闭,在金相图像中,同一金相组织处于不同区域其相应的灰度覆盖范围差异也比较大,因此选取合适的灰度等高线要根据基础边缘的特征决定。对于一条连通的基础边缘,它的位置必然存在于局部的灰度骤变区,而终止于骤变低于阈值的缓变区,终止的区域就是该连通边缘的端点,因此,等高线灰度的计算应该参考相应边缘端点的一定范围内的

邻域,这样才能选取合适的等高线灰度值。

本文提出的计算所需灰度等高线值的步骤如下:

(1) 遍历图 2(e) 像素,对所有的基础边缘连通体进行标注,以区分不同的连通基础边缘。

(2) 按标注顺序对基础边缘的端点进行检查,以图 1 的 8 邻域范围仅有 1 连通或 4 方向内无同侧同向连通作为端点的判断标准,判断式为 (9),得到端点表 $Endpoint[i]$

$$(|\max(x_i) - \min(x_i)| < 2) \text{ and } (|\max(y_i) - \min(y_i)| < 2) \quad (9)$$

式中: x_i, y_i 是该点 8 邻域内符合连通条件的像素坐标。

1
32 ×

1	1	1	1	1
1	2	2	2	1
1	2	0	2	1
1	2	2	2	1
1	1	1	1	1

图 5 基于基础边缘端点的灰度等高线值计算模板
Fig. 5 Calculate mask of contour line value base on end point of basic edge

(3) 遍历所有基础边缘的端点,在以端点的坐标为中心的 5×5 范围内,按图 5 的模板根据图 2(b) 对应的图像的灰度中值计算灰度等高线的值:

$$d_i = \frac{1}{\sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 (n_{ij})} \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 (n_{ij} \times I(i, j)) \quad (10)$$

d_i 为等高线灰度值, n_{ij} 为图 5 模板对应的系数, $I(i, j)$ 为图 2(b) 对应的像素灰度。

通过式(10)的计算可以获取所有基础边缘端点 $Endpoint[i]$ 对应的灰度等高线值 d_i 。

3.3 基础边缘与灰度等高线的融合

获取了基础边缘端点对应的灰度等高线值后要考虑的是基础边缘与灰度等高线的融合问题。由上述讨论可知,本算法的灰度等高线必然产生于基础边缘的端点,如果要形成闭合曲线不能漫无目的地生长,应该结束于基础边缘或图像边缘,

才能达到闭合的目的。这样,就为基础边缘与灰度等高线的融合过程设定了起始和结束条件。

一个图像坐标能否成为融合的边缘取决与下列条件:

(1) 该坐标对应于基础边缘

(2) 待判断坐标位于融合边缘端点 8 邻域范围内,待判断坐标灰度与 8 邻域对应的灰度图像的其他像素的关系符合较低等高线定义且该坐标不属于已存在的融合边缘。

只要符合上述两个条件中的任一个就是融合的图像边缘。图 6 显示了一个坐标是否符合融合条件 2) 的例子, $d = 128, X$ 为已经存在的融合边缘。

123	113	117
108	122	139
99	110	130

(a) 中心坐标为 (i, j) 的 3×3 范围灰度图像
(a) 3×3 neighborhoods of grayscale image for centre coordinate (i, j)

0	0	X
0	0	0
X	X	0

(b) 中心坐标 (i, j) 的 3×3 范围融合边缘分布
(b) 3×3 neighborhoods of fusion edge for centre coordinate (i, j)

图 6 中心坐标为 (i, j) 符合条件 2) 的像素
Fig. 6 Pixels with centre coordinate of (i, j) and matching condition 2

有了上述融合条件,可以遍历已生成的融合边缘端点生成融合边缘。本文提出的基础边缘与灰度等高线的融合算法过程如图 7 所示。该算法的主要思想如下:

(1) 该算法对之前产生的端点列表 $Endpoint[i]$ 进行遍历。

(2) 根据每一个端点的位置对闭合状态进行判断,如果其 8 邻域内存在其他的边缘连通体,说

明该点已经连通了不同的边缘,据此修改边缘连通体范围和标志,并且该点已不再是端点,需要从端点列表中删除。

(3) 对每一个端点进行边缘融合条件检查,符合融合条件的端点可作为新的边缘端点添加到端点列表 $\text{Endpoint}[i]$ 中;同时,原来的端点已不再是端点,需要删除。

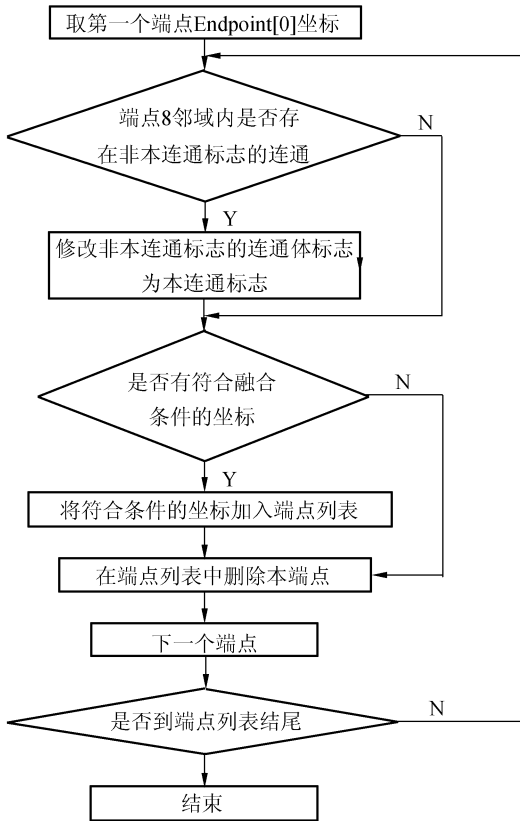


图 7 边缘融合算法流程图

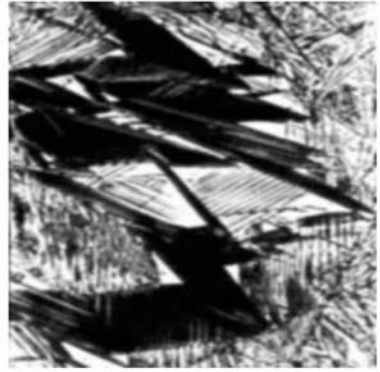
Fig. 7 Algorithm flowchart of edge fusion

4 实验结果与分析

本文的软件实验环境采用的是 vs. net2003 下的 vc++ 的开发环境。实验中,采用本文提出的 Canny 算法和灰度等高线相结合的算法对不同的金相组织图像进行边缘提取,所获得边缘和原图的对比由图 8 所示。

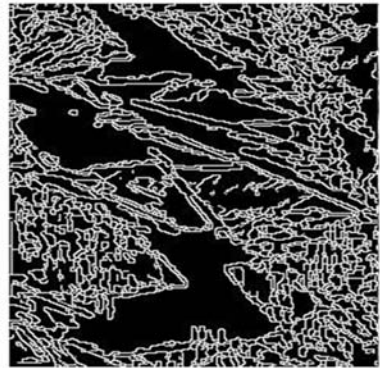
图 8(a)是马氏体(黑色)和奥氏体(白色)共存的金相组织图像,采用本文的边缘提取方法获得的边缘图由图 8(b)所示。由图中可见,所获得的边缘曲线都构成了封闭的区域。图 8(e)是原

图和封闭边缘的合成图,由该图可以看到,封闭的曲线区域对图像实现了较好的分割,可以对外形复杂和灰度变化幅度迥异的区域实现边缘提取,提取的边缘曲线符合图像的边缘特征,并与之对应。



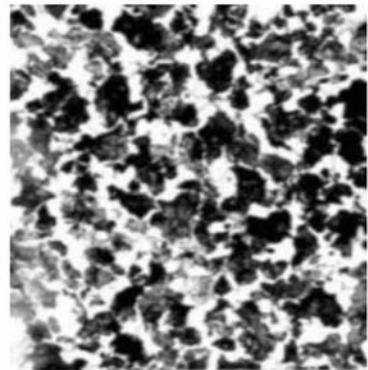
(a) 马氏体和奥氏体金相组织

(a) Metallographical image of martensite and austenite



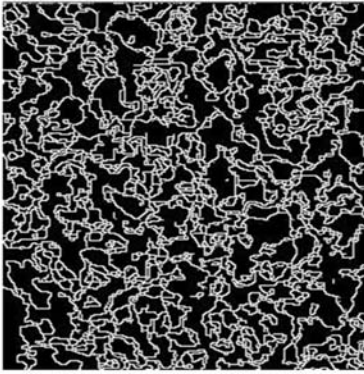
(b) 根据(a)生成的封闭边缘

(b) Closing edge image of (a)

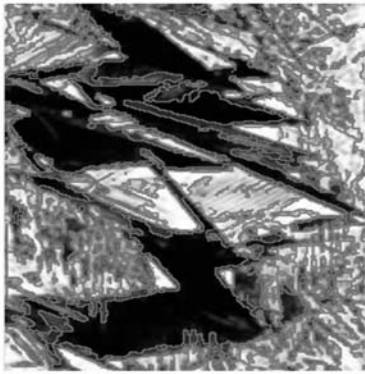


(c) 珠光体和铁素体金相组织

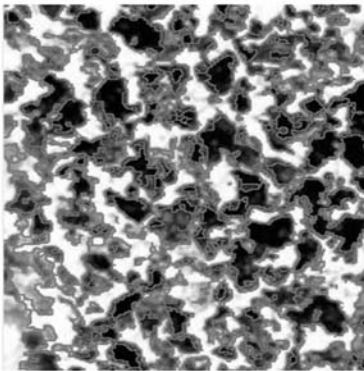
(c) Metallographical image of pearlite and ferrite



(d)根据(c)生成的封闭边缘
(d) Closing edge image of (c)



(e)(a)和(b)的叠加图
(e) Overlay image of (a) and (b)



(f)(c)和(d)的叠加图
(f) Overlay image of (c) and (d)

图 8 金相组织图像与相应的封闭边缘

Fig. 8 Metallographical images and their closing edges

图 8(c)是珠光体和铁素体(白色)共存的金相组织图像,图中可见,除明显白色的部分外,视觉上的灰色物质和黑色物质在灰度上有两个不同的明显灰度层次,除此之外,灰色物质也和白色物

质以及灰色物质和黑色物质在部分区域有一定程度交融。图 8(d)是本文算法提取的边缘,由该图可见,所形成的边缘曲线都形成了封闭区域。图 8(f)是(c)和(d)的叠加图,由该图可见,本文算法产生封闭边缘所形成分割区域与其灰度特征和边缘分布相对应。

实验结果显示,本文所提出算法可以有效形成与图像边缘相符的封闭边缘曲线。由图 8(c)的实验也可以看到,多峰值灰度的图像也能有效地进行封闭边缘提取和准确的区域划分。同时,由于图像的某些边缘灰度变化较缓和,且区域面积比较大,为避免错误划分,本算法会把该类区域划分为独立的区域以供后期识别和判断。

5 结 论

金相组织含量分析等定量分析需要对不同的金相组织进行准确而完整的边缘划分,为此,本文采用 Canny 算法和灰度等高线相结合的方法来生成封闭的金相组织区域。首先,采用 Canny 算法提取金相组织的原始边缘;然后,采用最大类间方差法(OTSU)对原始边缘进行自动阈值分割,以产生基础边缘;最后,用基于基础边缘端点灰度中值的灰度等高线对基础边缘进行延伸,与其他基础边缘融合形成封闭边缘。采用 Canny 算法产生的基础边缘具有单边缘效应的特点,产生于灰度变化梯度较大的区域,可以提高基础边缘的准确性;采用基于基础边缘端点邻域灰度中值的灰度等高线具有封闭特征,可以弥补 Canny 等梯度算法对灰度缓变区不敏感的特点,而形成封闭边缘。

封闭边缘的形成不仅可以为定量分析提供计算区域,其形成的分割区域还有利于不同相金相组织的目标特征提取,可为金相组织的自动识别提供很好的基础。实验结果证明,采用该算法进行金相组织区域划分可以形成准确的封闭区域,在金相组织含量定量分析中,采用本算法进行的定量分析与 GB/T 13305-2008 中的标准图谱对比法相比,误差降低到 $\pm 1\%$,不同相含量的判定范围变得更大,可以达到 $5\% \sim 95\%$,而且再现性好,普遍适用于各种金相组织。

参考文献:

- [1] GB/T 13305-2008. 不锈钢中 α -相面积含量金相测定法[S].
GB/T 13305-2008. Micrographic method for determining area content of the α -phases in stainless steels [S]. (in Chinese)
- [2] 刘持森. 双相不锈钢中相含量的精确测定[J]. 理化检验-物理分册, 2003, 39(8): 414-416.
LIU CH S. Measuring the phase content of dual-phases stainless steel accurately [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing*, 2003, 39(8): 416-417. (in Chinese)
- [3] 燕惠芳. 钢铁金相组织自动识别系统关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006: 40-46.
YAN H F. *Research on key technologies of automatic identification system of metallography organization* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 40-46. (in Chinese)
- [4] 汤力琨. 金相组织图像分析中关键算法研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 18-24.
TANG L K. *Research of some key algorithms in metallographic image analysis system* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 18-24. (in Chinese)
- [5] 黄丽华. 彩色金相显微图像分析系统的建立与彩色图像分割方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 67-77.
HUANG L H. *The establish of color metallography computer-aided analysis system & the research on color image segmentation* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 67-77. (in Chinese)
- [6] RAFAEL C G, RICHARD E W, STEVEN L E. *Digital Image Using MATLAB* [M]. Beijing: Publishing Houses of Electronics Industry, 2006.
- [7] 张建伟, 张启衡. 基于块遍历的直线边缘特征提取[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 662-668.
ZHANG J W, ZHANG Q H. Line-edge feature extraction based on ergodic block [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 662-668. (in Chinese)
- [8] 陈平, 潘晋孝, 刘宾. CT 图像边缘退化模型的建立及其在图像尺寸测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2269-2275.
CHEN P, PAN J X, LIU B. Computed tomography image edge degradation model and its application to image size measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2269-2275. (in Chinese)
- [9] DENG S C, LIU T G, XIAO Z X, *et al.*. An automatic detection system for flatness of integrated circuit pins[C]. *Proc. SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 2008 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Optoelectronic Instruments*, Beijing, 2008, 7156: 715639.
- [10] CANNY J A. Computational approach to edge detection [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [11] 向静波. 基于 Contourlet 变换和 Canny 算子的图像边缘检测方法[J]. 红外技术, 2009, 31(8): 479-482.
XIANG J B. Edge detection of image based on canny operator and contourlet transform [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(8): 479-482 (in Chinese)
- [12] 何瑾, 刘铁根, 张昊, 等. 应用形态学 top-hat 变换的支票方形印鉴自适应分割[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2583-2591.
HE J, LIU T G, ZHANG H, *et al.*. Automatic seal identification using edge difference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2583-2591. (in Chinese)

作者简介:



邓仕超(1973—),男,广东顺德人,博士研究生,1995年于浙江大学获学士学位,2005年于桂林电子科技大学获硕士学位,主要从事图像处理、图像识别和嵌入式图像处理等方面的研究。E-mail: dsc_2002@sohu.com



萧泽新(1942—),男,广西容县人,教授,博士生导师,1966年于广西师范大学获学士学位,主要从事光学设计、光机电一体化设计等方面的研究。E-mail: gjd@guet.edu.cn

导师简介:



刘铁根(1955—),男,天津人,教授,博士生导师,1987年、1999年于天津大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光电检测、嵌入式图像处理技术和光纤传感等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn

(本栏目编辑:白雨虹)

●下期预告

力反馈式微机械加速度计刚度的自适应调整

李童杰,刘云峰,董景新,范 达

(清华大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

为了提高模拟力平衡式电容微机械加速度计的鲁棒性和分辨率,对系统的非线性进行了研究。首先,分析了系统的数学模型,得出力发生器的非线性会引入一个可变负刚度。接着,分析了传统方案中要保证加速度计满量程时,总刚度大于零,预载电压要小于失稳预载的 0.707,从而会造成加速度输入较小时其总刚度较大,影响其阈值以及小输入时的分辨率。然后,基于自适应理论,设计出一种基于总刚度不变的变预载自适应调整方法,该方法能提高闭环系统的鲁棒性和分辨率。最后,设计了一种基于 DSP 的数字式微机械加速度计,并采用了刚度自适应调整方案。试验结果表明:0g 附近的分辨率由 43.2 μg 提高到 11.3 μg ,1g 附近分辨率由 36.4 μg 提高到 12.1 μg 。结果验证了自适应调整方案对系统性能的改进。