



中华人民共和国国家标准

GB/T 38879—2020

颗粒 粒度分析 彩色图像分析法

Particle—Size analysis—Color image analysis methods

2020-06-02 发布

2020-08-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 样品准备	3
5 图像采集	3
5.1 总则	3
5.2 采集	3
6 图像处理与分析	4
6.1 总则	4
6.2 图像预处理	4
6.3 颗粒图像分割	4
6.4 粒度测量与计算	5
6.5 颗粒的分类	6
7 校准和溯源	6
8 测试报告	7
附录 A (资料性附录) 基于彩色图像进行颗粒粒度分析的典型步骤流程图	8
附录 B (资料性附录) 图像处理常用的颜色空间以及之间的转换关系	9
附录 C (资料性附录) 基于模糊 C 均值聚类的彩色图像分割算法基本原理和步骤	12
附录 D (资料性附录) 在 CIE LAB 颜色空间下进行颗粒彩色图像分割过程及结果示例	14
参考文献	17

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会(SAC/TC 168)提出并归口。

本标准起草单位：上海理工大学、中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院、丹东百特仪器有限公司、北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司、深圳市德方纳米科技股份有限公司、中科院过程工程研究所、中机生产力促进中心、北京市理化分析测试中心、仪思奇(北京)科技发展有限公司。

本标准主要起草人：周骛、邓文晶、徐喜庆、蔡小舒、董青云、李兆军、苏明旭、李力、王远航、高原、余方、杨正红。



引 言

图像法已成为颗粒分析的主要方法之一,静态和动态图像法一般基于颗粒的灰度图像进行阈值分割,从二值化的颗粒图像中提取粒度等信息。相比于颗粒的灰度图像,彩色图像蕴含更丰富的颜色和纹理等信息,有助于颗粒的分割与识别,因此本标准针对颗粒彩色图像进行颗粒粒度分析,旨在对颗粒彩色图像的获取、处理及其适用范围提供指导。



颗粒 粒度分析 彩色图像分析法

1 范围

本标准规定了颗粒彩色图像的采集、处理以及颗粒粒度分析的方法。

本标准适用于图像法粒度粒形分析仪、显微镜、扫描仪或相机等彩色图像采集设备对颗粒粒度的测定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 15445.1 粒度分析结果的表述 第1部分:图形表征

GB/T 21649.1—2008 粒度分析 图像分析法 第1部分:静态图像分析法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

颜色空间 color space

表示颜色的三维空间。

注1:即每个颜色都表示为三维坐标系中的一个点。颜色空间也称为彩色模型,常用的颜色空间有RGB、CIE LAB、HSV和HSI等。

注2:改写GB/T 5698—2001,定义4.57。

3.2

色调 hue

表示红、黄、绿、蓝、紫等颜色特性。

颜色的三属性之一。

注:颜色的重要属性,决定颜色的本质,是人们对物体表面呈现出的某种颜色的感觉。

[GB/T 5698—2001,定义5.7]

3.3

明度 lightness

在同样的照明条件下,以白板作为基准,对物体表面的视知觉特性给予的分度。

颜色三属性之一。

注:改写GB/T 5698—2001,定义5.8。

3.4

饱和度 saturation

用以估价纯彩色在整个视觉中的成分的视觉属性。

[GB/T 5698—2001,定义5.10]

3.5

对比度 contrast

在视场上同时或相继出现两个部分时的外观上差别的估计。对比包括亮度对比、明度对比和色对比等。

注：在粒度分析中为组成颗粒对象的前景像素与颗粒邻近区域的背景像素之间、或不同颗粒对象像素之间的明度或色彩差异。

[GB/T 5698—2001, 定义 5.33]

3.6

颜色直方图 color histogram

描述不同色彩分量在图像中所占比例的图。

3.7

颜色矩 color moment

对彩色图像各分量图的基于矩的颜色特征表示。

注：颜色矩可以用于任何颜色空间，有一阶矩、二阶矩、三阶矩等。

3.8

空间关系 spatial relation

图像中像素之间或分割出来的多个目标之间的相互空间位置或相对方向关系。

3.9

纹理 texture

基于包含多像素点的区域进行统计计算获得的特征信息。

3.10

图像分割 image segmentation

把图像中具有某种特定意义的区域划分开来，彼此互不相交，每个区域满足灰度、纹理、颜色等相似性准则。

3.11

阈值 threshold

将物像从背景中区分出来设置的灰度等级。

[GB/T 21649.1—2008, 定义 3.1.13]

3.12

聚类 cluster

将物理或抽象对象的集合分成由类似的对象组成的多个类的过程。

注：在颗粒彩色图像粒度分析中一般基于色彩特征进行聚类。

3.13

边缘检测 edge detection

根据目标对象边缘像素点灰度阶跃变化来确定轮廓的过程。

3.14

测试框 measurement frame

视场内的一个区域，在此区域中对颗粒进行统计和图像分析。

注：一系列的测试框构成总的测试区域。

[GB/T 21649.1—2008, 定义 3.1.2]

3.15

相似度 similarity

度量图像中像素点在某种特征信息上的近似程度。

3.16

畸变 distortion

物体所成的像相对于物体本身而言的失真现象。

3.17

噪声 noise

图像数据中的不必要的或多余的干扰信息。

3.18

鲁棒性 robustness

系统在不确定性的扰动下仍能维持其性能的能力。

3.19

费雷特直径 Feret diameter

与颗粒图像轮廓两边相切的平行线之间的距离。

[GB/T 21649.1—2008, 定义 3.1.6]

3.20

勒让德惯性椭圆 Legendre ellipse of inertia

中心位于颗粒质心,且与原始颗粒面积有相同的一阶和二阶几何惯性矩的椭圆。

注 1: 椭圆可以用长轴和短轴、重心位置和方向来表征。

注 2: 改写 GB/T 15445.6—2014, 定义 8.1.2。

3.21

椭圆率 ellipse ratio

勒让德惯性椭圆的短轴长度与长轴长度之比。

注: 改写 GB/T 15445.6—2014, 定义 8.1.3。

3.22

长宽比 aspect ratio

费雷特最短直径和费雷特最长直径之比。

[GB/T 15445.6—2014, 定义 8.1.3]

4 样品准备

不同的彩色颗粒样品有不同的制备方法或行业要求,应遵照相关标准进行样品制备,保证从原始样品上选择的测试或分析样品具有代表性。

样品制备应将颗粒物充分分散,尽量避免轮廓的重叠,选择适当的光源强弱使颗粒物界限足够清晰。

5 图像采集

5.1 总则

使用彩色图像采集设备来获取颗粒彩色图像并测量颗粒粒度时,在遵循仪器设备相关操作规范的前提下,应保证颗粒与背景的颜色或灰度具有较大差异。

5.2 采集

图像采集的要求如下:

- a) 根据待测颗粒的粒度范围和测量所需精度,选择合适的光学倍率。

- b) 采集设备安装完成后,对不同光学倍率下计量标尺和像素之间进行换算,得出相关系数并保存。在正式测量时,根据实际测量倍数完成相应设置。
- c) 获取图像时,调整光圈以避免过度曝光或曝光不足,选择合适的滤波片和偏振角度,得到满意的对比度和饱和度,进而得到清晰的图像。
- d) 在图像中选择可识别的颗粒,尽可能提取测试框中的全部颗粒。
- e) 在每幅图像中选择相当数量且不重复的测试框,测试过程中,操作条件不能更改。

6 图像处理与分析

6.1 总则

基于彩色图像分析方法进行粒度分析的先决条件是充分理解和利用图像的信息,应考虑到图像处理过程每一步骤的可靠性,颗粒彩色图像处理与分析主要包括颗粒彩色图像预处理、图像分割以及颗粒图像粒径测量等。基于彩色图像进行颗粒粒度分析的典型步骤流程图参见附录 A。

6.2 图像预处理

6.2.1 彩色图像预处理包括几何校正、滤波去噪、对比度增强等过程。只要测量结果符合要求,可根据需要选用具体的图像预处理操作。

6.2.2 原始图像存在局部畸变时需要进行图像几何校正,使原始图像上颗粒的几何位置、形状和尺寸等特征与其对应的样品参照物相一致。如果仪器设备出厂时已经过几何校正,使用中与出厂设置一致时则不需要再进行几何校正,厂家提供相应校正方法的,采用仪器设备厂家提供的校正方法。

其他情况建议采用“张正友标定法”进行几何校正。

注:“张正友标定法”相关文献参见参考文献[5]。

6.2.3 图集采集过程中应根据噪声来源和性质,采取不同的对策来抑制噪声的强度,同时选择合适的滤波算法来提取更为真实的轮廓边缘信息,尽量避免滤波带来的失真。

6.2.4 为了将颗粒对象与其背景区域分割开来,充分的对比度对于颗粒目标识别和尺寸测量都是至关重要的。允许采用图像增强算法在分割前增强图像对比度。

6.3 颗粒图像分割

6.3.1 总则

在图像分割中,原始颗粒图像像素点根据相应特征被分为背景像素和隶属于彩色颗粒的目标像素集。颗粒彩色图像的分割应考虑但不限于色彩特征,其他如空间关系特征、纹理特征和形状特征等也可同时作为分割的依据。颗粒彩色图像孔洞的填充、小区域的去除可以看作图像分割的附加过程。

彩色图像分割、分析方法往往依赖于一个或多个参数,需要预先对颗粒彩色图像分析方法的鲁棒性进行验证。如果这些参数是由用户设置的,则应基于待分析颗粒彩色图像进行多次验证性试验,检查参数设置的准确性和稳定性,以确保参数的微小变化不会影响最终的粒度分析结果。

6.3.2 图像特征提取

色彩特征是在彩色图像处理中应用最广泛的视觉特征,也是颗粒彩色图像首要考虑的图像特征。色彩特征对图像本身的尺寸、方向和视角的依赖性较小,具有较高的鲁棒性。提取图像的色彩特征时,应选择合适的颜色空间,以利于颗粒彩色图像的分割。图像处理常用的颜色空间以及之间的转换关系参见附录 B。

如有需要,在色彩特征的基础上,可结合像素点的空间关系特征或多像素点区域的纹理特征,采用

相应的量化方法将多种特征信息表达为向量的形式,作为分割的依据。

6.3.3 彩色图像分割方法

6.3.3.1 彩色图像分割方法主要分为以下几大类:

- 基于阈值的分割方法;
- 基于聚类的分割方法;
- 基于边缘检测的分割方法。

应针对实际颗粒图像特征选择合适的分割理论模型和处理算法,或综合多种分割思想的优点,以实现彩色颗粒准确分割识别。

注:典型彩色图像分割思想相关文件见参考文献[6]和[7]。

6.3.3.2 在颗粒彩色图像中目标颗粒与背景占据不同的灰度级范围,具有较强灰度对比度的情况下,可将彩色图像灰度化后基于灰度图像进行阈值分割。如果根据灰度图像无法准确地将颗粒与背景分割,则应基于颜色空间某单分量图像的阈值分割,或者联合多分量图像的阈值分割。

阈值分割不能满足要求时,宜考虑基于颜色空间聚类的图像分割方法,此时应注意选择最佳的聚类数目和初始聚类中心。在聚类相似度判据中可综合考虑图像色彩特征、空间关系特征和纹理特征等。基于模糊 C 均值聚类的彩色图像分割算法基本原理和步骤参见附录 C。在 CIE LAB 颜色空间下进行颗粒图像分割的示例参见附录 D。分割结果可按照颜色信息分成不同的图层,以用于进一步粒度测量与计算。

也可以采用边缘检测算子对颗粒彩色图像进行分割,可组合各分量图像上的边缘检测结果,或者将图像中的每一个像素点当作颜色空间中的一个矢量,然后利用矢量空间的特性进行边缘检测。

6.3.4 粘连颗粒分割

颗粒彩色图像分析法可以利用色彩和空间信息,对粘连颗粒的彩色图像进行一定程度的分割和识别,若依然存在紧密重叠团聚颗粒或颜色较近的粘连颗粒图像,可采用自动和手动方式进行分割,以确保准确可靠地分割粘连颗粒。

6.3.5 颗粒孔洞填充和小区域去除

颗粒彩色图像分割处理后的图像中可能会存在孔洞或噪声像素点组成的小区域。

具有一定透明度的颗粒在成像过程中将形成亮斑,会导致图像处理存在孔洞,颗粒孔洞应进行填充。

噪声像素点造成的小区域,一般来说明显小于被测颗粒尺寸。小区域应予以去除。

6.4 粒度测量与计算

对于已分割出来的颗粒图像,粒度测量与计算应以像素为基本单位进行逐个计数,获得的直接测量数据应包括:

- a) 每一颗粒的投影面积 A_i ;
- b) 每一颗粒的费雷特最长直径 $x_{Fmax,i}$;
- c) 每一颗粒的费雷特最短直径 $x_{Fmin,i}$;
- d) 每一颗粒的勒让德惯性椭圆的长轴长度 $x_{Lmax,i}$;
- e) 每一颗粒的勒让德惯性椭圆的短轴长度 $x_{Lmin,i}$ 。

颗粒粒度分析的参数应包括颗粒的面积等效直径 $x_{A,i}$,长宽比 AR 和椭圆率 ER。在最终给出粒度定量分析结果报告前,宜将像素转换成实际的尺寸,便于定量分析。

颗粒的面积等效直径 $x_{A,i}$ 按照式(1)进行计算:

$$x_{A,i} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

$x_{A,i}$ ——颗粒的面积等效直径,单位为微米(μm);

A_i ——颗粒的投影面积,单位为平方微米(μm^2)。

颗粒的长宽比 AR 按照式(2)进行计算:

$$\text{AR} = \frac{x_{F\max,i}}{x_{F\min,i}} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

AR ——颗粒的长宽比;

$x_{F\max,i}$ ——颗粒的费雷特最长直径,单位为微米(μm);

$x_{F\min,i}$ ——颗粒的费雷特最短直径,单位为微米(μm)。

颗粒的椭圆率 ER 按照式(3)进行计算:

$$\text{ER} = \frac{x_{L\min,i}}{x_{L\max,i}} \dots\dots\dots(3)$$

式中:

ER ——颗粒的椭圆率;

$x_{L\max,i}$ ——颗粒的勒让德惯性椭圆的长轴长度,单位为微米(μm);

$x_{L\min,i}$ ——颗粒的勒让德惯性椭圆的短轴长度,单位为微米(μm)。

假设某颗粒群中,粒径为 x_i 的颗粒数目为 n_i ,颗粒的数目统计平均粒径 x_m 和方差 S^2 由式(4)和式(5)给出:

$$x_m = \frac{\sum x_i n_i}{\sum n_i} \dots\dots\dots(4)$$

$$S^2 = \frac{\sum n_i (x_i - x_m)^2}{\sum n_i - 1} \dots\dots\dots(5)$$

从同一幅颗粒彩色图像的不同测量区域中获取的颗粒统计平均粒径和方差经过方差分析和 F 检验,检验结果应在给定的显著性水平范围内,见 GB/T 21649.1—2008 附录 E。

6.5 颗粒的分类

基于颗粒的粒径大小、颗粒图像的颜色直方图、颜色矩或纹理特征等,根据待测颗粒样品本身的特征来决定分类的依据和类别。分为不同类别之后,应分别计算每个类别的粒度信息。

7 校准和溯源

7.1 所有测量结果应溯源至相应的国家计量基标准,标定像素与实际大小比例尺时,最终结果应将像素转换成 SI 单位(如纳米、微米、毫米)。

7.2 可使用粒度标准物质,在与常规分析相同的照明、对比度等条件下进行设备校准。

7.3 使用粒度标准物质校准设备时,从彩色图像采集设备中获取的相应颗粒彩色图像的粒径应尽量涵盖整个图像分析测量系统的测量粒径范围,建议用系统可测量最大、最小粒径和与平均粒径相近的粒度标准物质进行检验。

7.4 颗粒与背景之间应具有较高的色彩对比度。

7.5 控制图像中颗粒的分散度,颗粒间尽可能避免粘连现象。

8 测试报告

8.1 测试报告应包括但不限于以下内容：

- a) 样品
 - 1) 颗粒样品标识；样品名称、种类、编号等；
 - 2) 样品准备，取样方法；
 - 3) 颗粒彩色图像采集设备名称。
- b) 图像分析
 - 1) 本标准号；
 - 2) 图像预处理方法；
 - 3) 颜色空间；
 - 4) 图像分割算法类型，输入参数设置；
 - 5) 算法应用试验环境、软件配置；
 - 6) 测量日期和时间。
- c) 测量结果
 - 1) 根据测量需求，可对所有颗粒或分类后不同类别的颗粒分别获得以下结果：
 - 数目统计平均粒径；
 - 数目统计平均粒径的方差。
 - 2) 测量结果可包括每一个颗粒的测量结果：
 - 颗粒序号；
 - 颗粒等效面积直径；
 - 最大和/或最小费雷特直径；
 - 颗粒长宽比；
 - 勒让德惯性椭圆长轴/短轴长度；
 - 颗粒椭圆率；
 - 其他信息。

8.2 按照 GB/T 15445.1 规定以列表法和粒度分布直方图等图示法表征颗粒的粒度测量结果。

8.3 所有在本标准中未规范的操作步骤或对测量结果存在影响的因素应在测试报告中声明。

附录 A
(资料性附录)

基于彩色图像进行颗粒粒度分析的典型步骤流程图

图 A.1 给出了彩色图像分析法典型步骤流程图。

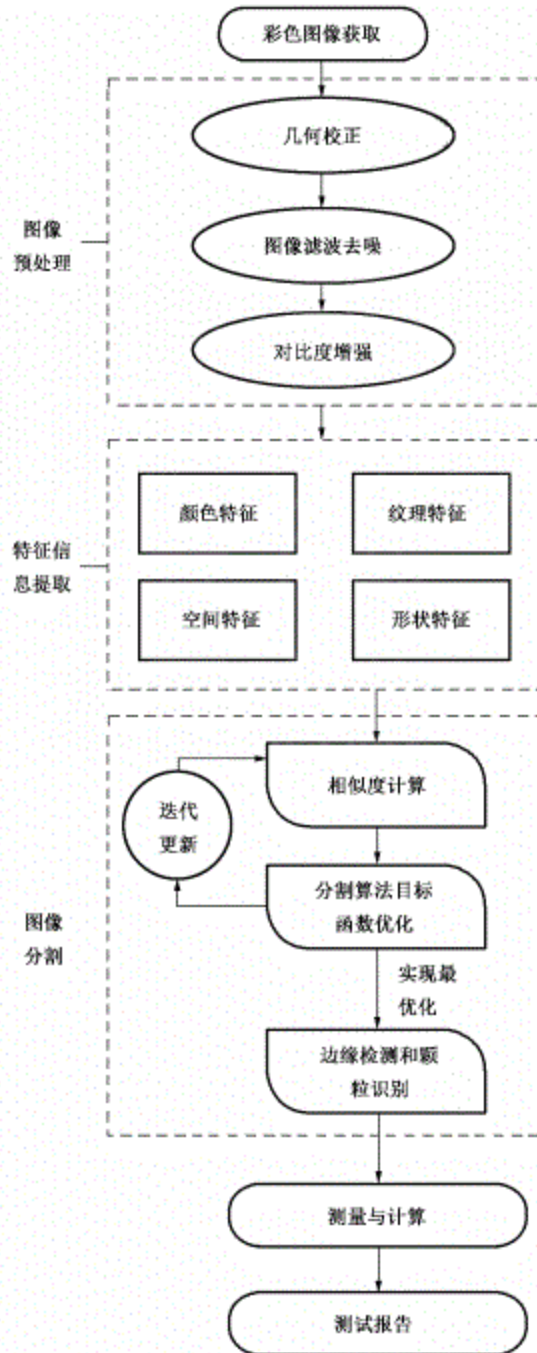


图 A.1 彩色图像分析法的流程图

附录 B
(资料性附录)

图像处理常用的颜色空间以及之间的转换关系

B.1 RGB 颜色空间

RGB 颜色空间是计算机图形学最为重要和常见的颜色模型,它可以用三维的笛卡尔坐标系表示,如图 B.1 所示,以红、绿、蓝三种基本色为基础,进行不同程度的叠加生成不同的颜色。表 B.1 为 RGB 颜色立方体中 8 种常见的颜色,分别位于立方体 8 个顶点。

当处理彩色图像时,使用 RGB 颜色空间并不是很有效,因为红绿蓝三种颜色成分之间密切相关,每种成分均会随着明度的变化而相应的改变,在 RGB 颜色立方体中生成任何一种颜色,三个 RGB 分量都需要占用相同的带宽,这就使得每个 RGB 颜色分量的帧缓冲需要同样的像素深度和现实分辨率。RGB 颜色空间的另一个缺点是空间均匀性差,不能将两种颜色之间的色差形象的表示为色彩空间上两点之间距离。

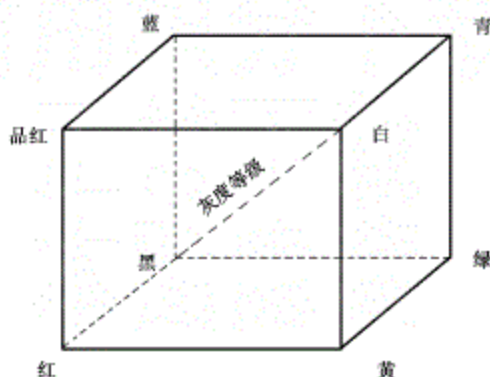


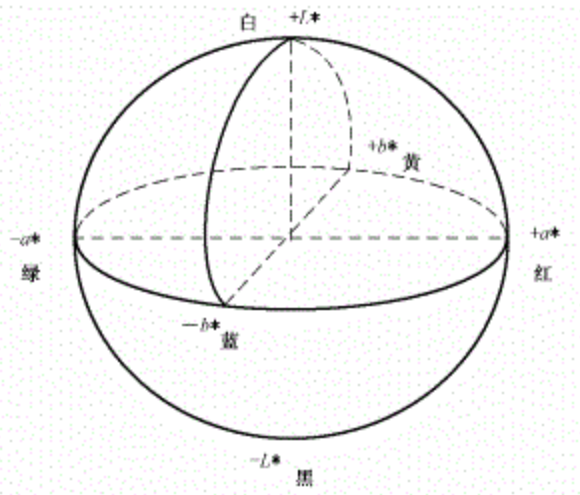
图 B.1 三维笛卡尔坐标系表示的 RGB 颜色空间

表 B.1 RGB 颜色空间 8 种常见颜色

颜色分量	正常范围	白	黄	青	绿	品红	红	蓝	黑
R	0~255	255	255	0	0	255	255	0	0
G	0~255	255	255	255	255	0	0	0	0
B	0~255	255	0	255	0	255	0	255	0

B.2 CIE LAB 颜色空间

CIE LAB 颜色空间是由国际照明委员会为了准确描述人眼可见的所有颜色而提出的一种色彩模型,它是一种基于生理特征并且与设备无关的均匀颜色空间,由明度分量(L^*)和包含色彩信息的分量(a^* , b^*)三要素构成,通过以数字化形式直接使用颜色空间的几何距离来实现不同颜色之间的对比,并且直观地描述了人眼的视觉感知,可以有效地应用于测量微小色差。其颜色空间模型如图 B.2 所示。



说明:

L^* —— 明度分量,用于表示像素的明度,表示从纯黑到纯白,取值范围[0,100];

a^* —— 色彩信息分量之一,表示从绿色到红色,取值范围[-128,127];

b^* —— 色彩信息分量之一,表示从蓝色到黄色,取值范围[-128,127].

图 B.2 CIE LAB 颜色空间模型示意图

RGB 颜色空间不能直接转换为 CIE LAB 颜色空间,需要借助 XYZ 颜色空间,把 RGB 颜色空间转换到 XYZ 颜色空间,之后再 把 XYZ 颜色空间转换 CIE LAB 颜色空间,如式(B.1)所示。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412 & 453 & 0.357 & 580 & 0.180 & 423 \\ 0.212 & 671 & 0.715 & 160 & 0.072 & 169 \\ 0.019 & 334 & 0.119 & 193 & 0.950 & 227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.1)$$

XYZ 颜色空间到 CIE LAB 颜色空间的转换参考式(B.2)~式(B.5):

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \dots\dots\dots (B.2)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \dots\dots\dots (B.3)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \dots\dots\dots (B.4)$$

其中:

$$f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \times \left(\frac{29}{3}\right)^2 t + \frac{4}{29}, & t \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases} \dots\dots\dots (B.5)$$

一般情况下, X_n 、 Y_n 、 Z_n 分别为 0.950 456、1.0 和 1.088 754。

B.3 HSI 和 HSV 颜色空间

HSI[Hue(色调)、Saturation(饱和度)、Intensity(明暗强度)] 和 HSV[(Hue(色调)、Saturation(饱和度)、Value(明暗程度)]颜色空间被设计接近于人眼的颜色感知和解释的方式,色调 H 与饱和度 S 包含的色度信息与人类色彩感知的范围密切联系,并且色度信息与明度分量相互独立。采用双六角锥模型显示的 HSI 颜色空间如图 B.3 a)所示,采用单六角锥模型显示的 HSV 颜色空间如图 B.3 b)所示。

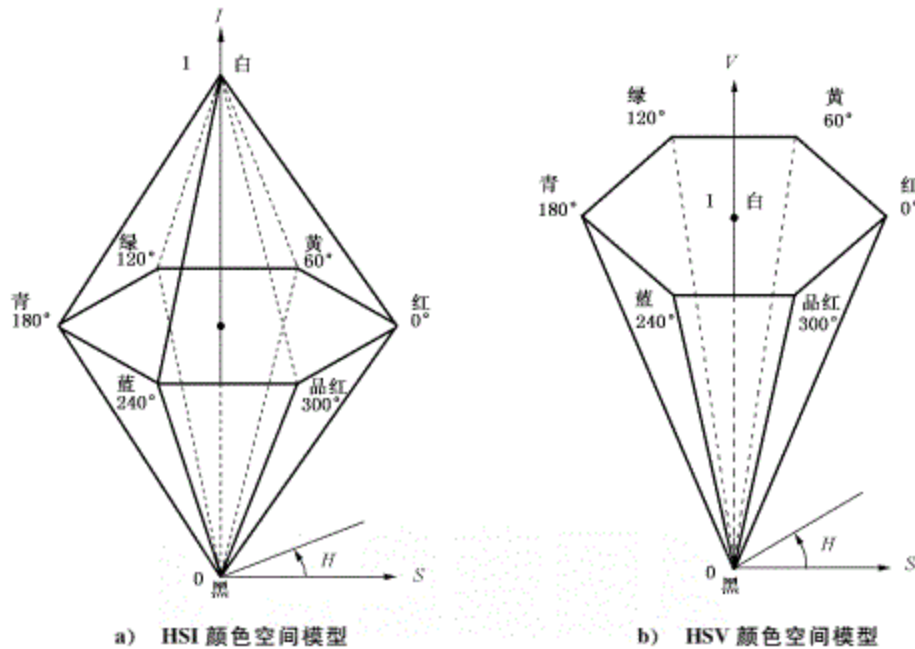


图 B.3 HSI 和 HSV 颜色空间示意图

HSV 和 HSI 颜色空间本质上是同属性的颜色空间,两者差异在于明度分量(I 和 V)的计算方式。式(B.6)~式(B.9)表示出了 RGB 颜色空间到 HSI 颜色空间的转换计算过程:

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad \text{.....(B.6)}$$

$$S = 1 - \frac{3\min(R, G, B)}{R + G + B} \quad \text{.....(B.7)}$$

$$H = \begin{cases} \theta, & G \geq B \\ 2\pi - \theta, & G < B \end{cases} \quad \text{.....(B.8)}$$

$$\theta = \arccos \frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \quad \text{.....(B.9)}$$

式(B.10)~式(B.15)表示出了 RGB 颜色空间到 HSV 颜色空间的转换计算过程:

$$C_{\max} = \max(R, G, B) \quad \text{.....(B.10)}$$

$$C_{\min} = \min(R, G, B) \quad \text{.....(B.11)}$$

$$T = \begin{cases} 60(G - B) / (C_{\max} - C_{\min}), & \text{当 } R = C_{\max} \text{ 时} \\ 60[2 + (B - R) / (C_{\max} - C_{\min})], & \text{当 } G = C_{\max} \text{ 时} \\ 60[4 + (R - G) / (C_{\max} - C_{\min})], & \text{当 } B = C_{\max} \text{ 时} \end{cases} \quad \text{.....(B.12)}$$

$$H = \begin{cases} T, & T > 0 \\ T + 360, & T < 0 \end{cases} \quad \text{.....(B.13)}$$

$$V = C_{\max} \quad \text{.....(B.14)}$$

$$S = (C_{\max} - C_{\min}) / C_{\max} \quad \text{.....(B.15)}$$

HSI 颜色空间适合传统的彩色图像处理函数,如卷积、均化、颜色直方图等,可以通过处理明度值来实现这些操作,明度 I 对 R 、 G 、 B 值的依赖程度是一样的。

HSV 颜色空间适合处理色度和饱和度,它使得饱和度具有更大的动态取值范围。

附录 C

(资料性附录)

基于模糊 C 均值聚类的彩色图像分割算法基本原理和步骤

聚类分析是利用数学的方法将研究样本对象自动分类的过程,是多元统计分析的一种,也是无监督模式识别的一个重要分支,广泛应用于模式识别、图像处理、数据分析以及模糊规则处理等众多领域。模糊 C 均值(FCM)聚类算法是最为典型的聚类分析算法,是在普通 C 均值聚类算法的基础上为每个数据归属引入了模糊隶属度的概念,普通 C 均值算法对于数据的划分是硬性的,而模糊 C 均值则是一种柔性的模糊划分,在模糊集理论上建立了样本数据对类别的不确定性描述,更符合客观世界亦此亦彼的特性。FCM 算法是一种基于划分的聚类算法,核心思想就是使得被划分到同一簇的对象之间相似度最大,而不同簇之间的相似度最小。

聚类分析的数学描述假设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是待聚类的样本集,其中 n 为样本个数,聚类分析就是将此 n 个样本对象划分成 c 个类别 X_1, X_2, \dots, X_c ,并使得 X_1, X_2, \dots, X_c 满足式(C.1)和式(C.2):

$$X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_c = X \quad \dots\dots\dots(C.1)$$

$$X_i \cap X_j = \emptyset, 1 \leq i \neq j \leq c \quad \dots\dots\dots(C.2)$$

从上述条件可以看出,样本集中的每一个样本最多并且只可能属于某一个类,这是一种硬聚类分析方法,把每个待识别的对象严格的划分某类中,具有“非此即彼”的性质,采用隶属度函数 u_{ij} 来表示一个样本对象 x_j 隶属于子集 X_i 的程度关系,在硬聚类分析中隶属度只有 0 和 1 两个值,划分的界限是明确的。模糊集理论把隶属度函数值 u_{ij} 从 $\{0,1\}$ 二值扩展到 $[0,1]$ 区间,从而为聚类思想引入了模糊度概念,模糊隶属度函数满足式(C.3):

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \forall j = 1, \dots, n \quad \dots\dots\dots(C.3)$$

FCM 算法通过计算每个聚类的中心 $v_i (i = 1, 2, \dots, c)$ 和隶属度函数 u_{ij} 组成的模糊隶属度矩阵 $U = [u_{ij}]_{c \times n}$,根据最大隶属原则确定每个样本点最终被分配至哪个类。FCM 聚类算法基于隶属度的目标函数形式由式(C.4)给出:

$$J_{FCM} = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij}^m) d^2(x_j, v_i) \quad \dots\dots\dots(C.4)$$

其中, m 为加权指数(平滑指数), $m \geq 1$ 。 $d(x_j, v_i)$ 表示第 j 个样本点与第 i 个聚类中心之间的欧式距离 $\|x_j - v_i\|$ 。

一般采用拉格朗日乘子法来最小化 FCM 聚类算法的目标函数,引入约束条件构建式(C.5)所示新函数:

$$L(u_{ij}, c_i, \lambda_j) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij}^m) d^2(x_j, v_i) + \sum_{j=1}^n \lambda_j (1 - \sum_{i=1}^c u_{ij}) \quad \dots\dots\dots(C.5)$$

从而求得目标函数聚类中心 v_i 和隶属度 u_{ij} 的更新公式如式(C.6)和式(C.7)所示:

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m} \quad \dots\dots\dots(C.6)$$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_k \left(\frac{\|x_j - v_i\|}{\|x_j - v_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad \dots\dots\dots(C.7)$$

FCM 聚类具体算法流程如下:

初始化:选取算法迭代停止阈值 ϵ ,设置算法最大迭代次数 T ;

步骤 1:用值在 $[0, 1]$ 内的随机数初始化隶属矩阵 U ,使其满足式(C.3)的约束条件;

步骤 2:根据式(C.6)计算 c 个聚类中心 $v_i(i=1,2,\dots,c)$;

步骤 3:由式(C.4)计算目标函数。此时如果算法迭代次数大于 T ,或它相对上次目标函数值的改变量小于阈值 ϵ ,则算法停止;

步骤 4:否则,用式(C.7)计算新的隶属度矩阵 U ,返回步骤 2。

FCM 聚类算法也可以先初始化聚类中心,然后再执行迭代过程。由于需要确保算法最终收敛于最优解,而算法的性能依赖于初始聚类中心的选择,因此可以根据其他快速的算法确定初始聚类中心,或者每次使用不同的初始聚类中心多次运行该算法。



附录 D

(资料性附录)

在 CIE LAB 颜色空间下进行颗粒彩色图像分割过程及结果示例

本附录给出了采用偏光显微镜和图像法粒度粒形分析仪获得的典型颗粒彩色图像及其分割过程和结果示例。

按照本标准规范的颗粒样品制备、图像采集的基本要求,和相关岩心样品制备方法(参见 GB/T 29172—2012 和 SY/T 5913—2004),获得一张岩心颗粒的显微偏振彩色图像,如图 D.1a)所示。

传统方式先将彩色图像进行灰度化形成灰度图像[见图 D.1b)],再对灰度图像进行阈值分割获得二值化图像,如采用灰度迭代法或灰度最大类间方差法获得二值化阈值进行分割,结果分别如图 D.1c)和图 D.1d)所示。

基于附录 C 所述的模糊 C 均值聚类分割思想,首先将岩心颗粒彩色图像转换至 CIE LAB 颜色空间下,经过滤波去噪、图像增强等预处理过程,然后提取色彩特征、空间关系特征和纹理特征等多维信息进行 FCM 聚类分割,聚类分割结果如图 D.1e)所示。

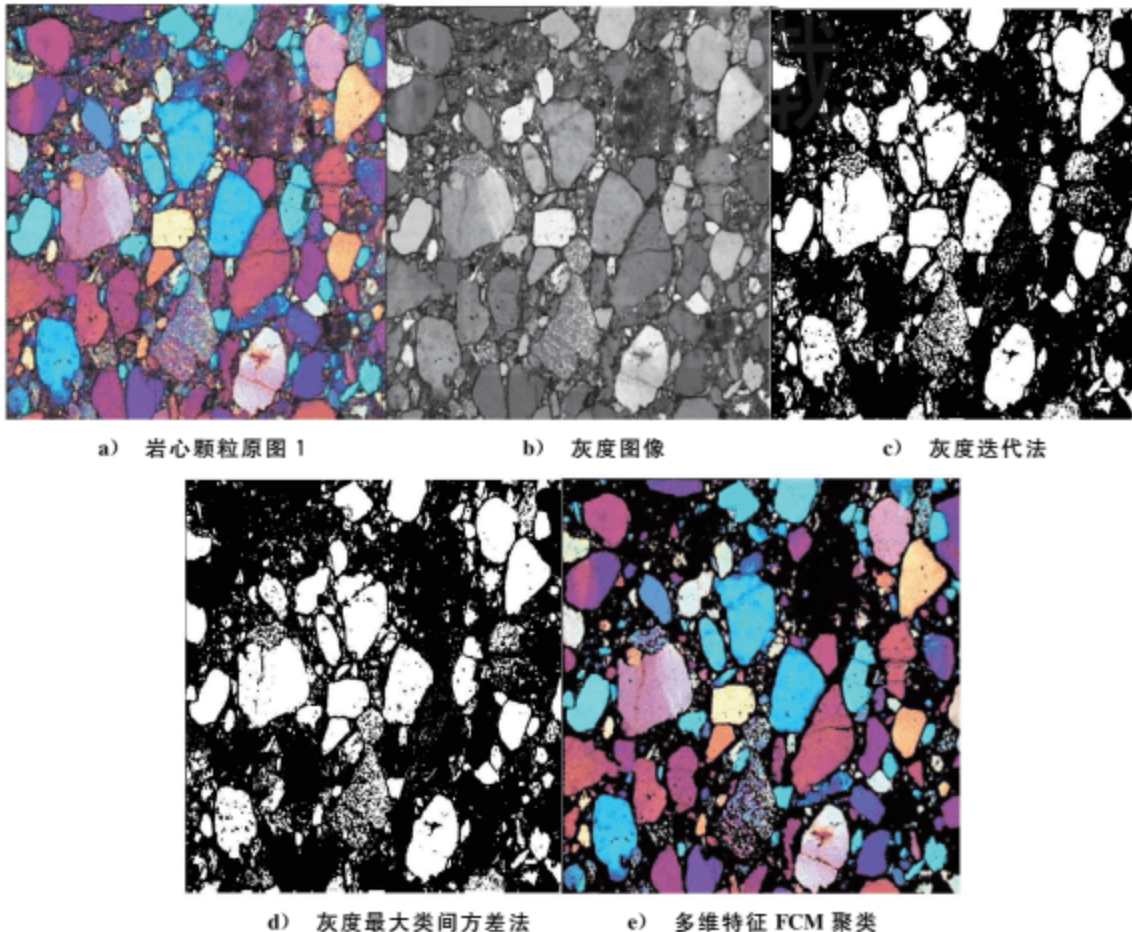


图 D.1 岩心颗粒彩色图像处理

图 D.1c)和图 D.1d)的处理结果相差不大,由于颗粒彩色图像进行灰度化的过程中颜色等特征信息丢失,仅仅依靠灰度信息进行阈值化分割,导致存在严重的颗粒未识别的现象,不能对图像中的颗粒信

息进行完整有效的提取。图 D.1e) 充分利用颗粒彩色图像的色彩特征、空间关系特征和纹理特征信息进行 FCM 聚类分割, 更准确地实现颗粒彩色图像的分割, 能进一步的获得更可靠的粒度分布信息。

颗粒彩色图像聚类分割结果可根据颜色信息将颗粒分成相应的图层, 如图 D.2 所示。对比图 D.2a) 与分层后的颗粒图像, 图 D.2a) 中黑色线框标记的粘连红蓝颗粒是粘连的, 但通过彩色图像处理可分开至不同的颗粒层进行统计, 而二值化过程中则极易分割为一个颗粒。



图 D.2 岩心颗粒彩色图像分层处理

图 D.3 为应用彩色图像分析法从图像中提取晶体颗粒的示例, 能准确地识别晶体的边缘信息, 并将每个晶体颗粒从图像中分割出来, 以便于对分割后的晶体进行粒度信息统计。

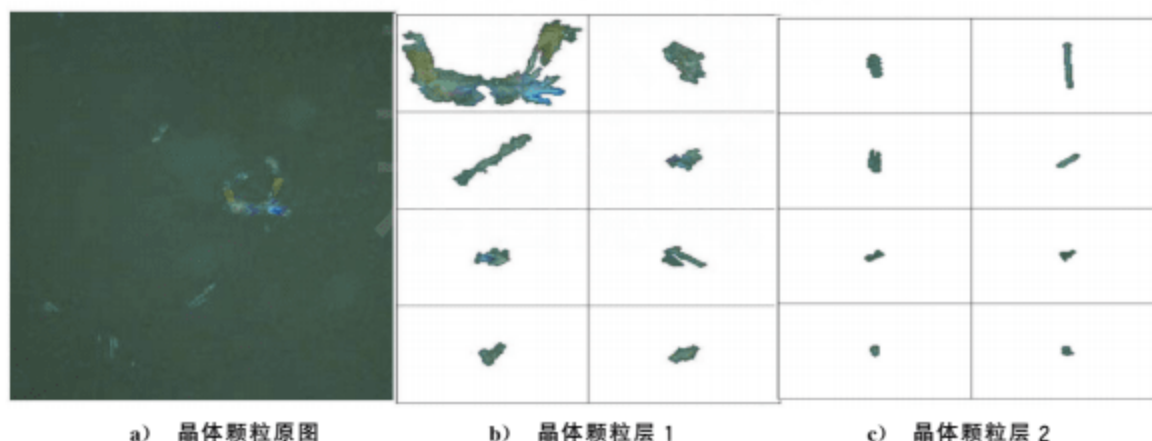


图 D.3 晶体颗粒彩色图像分割

图 D.4 为基于乳滴颗粒彩色图像进行的颗粒识别, 考虑颜色信息的同时, 着重于颗粒的边缘信息, 边缘梯度信息有助于颗粒间以及颗粒与背景之间更好的分离, 图 D.4 的三幅图像在不同的比例尺下, 图 D.4b) 与图 D.4c) 为从图 D.4a) 中提取出来的较大颗粒。

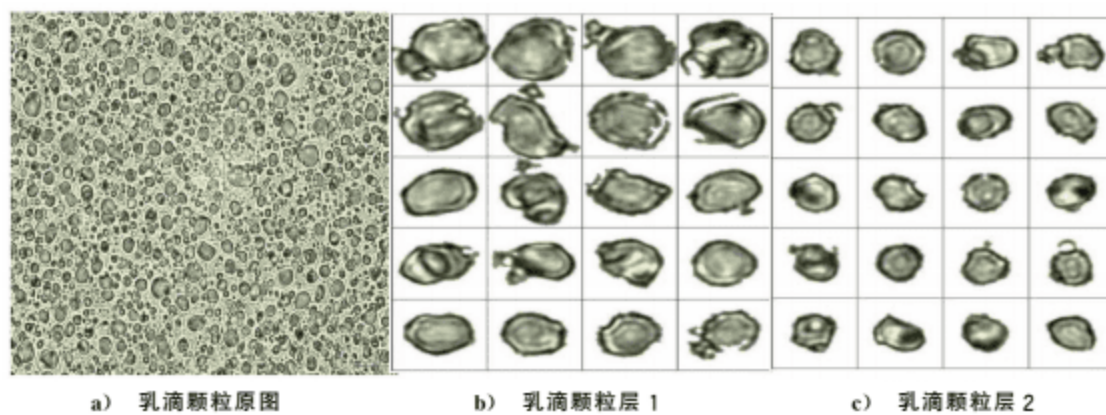


图 D.4 乳滴颗粒彩色图像分析

参 考 文 献

- [1] GB/T 5698—2001 颜色术语
- [2] GB/T 15445.6—2014 粒度分析结果的表述 第6部分:颗粒形状和形态的定性及定量表述
- [3] GB/T 29172—2012 岩心分析方法.
- [4] SY/T 5913—2004 岩石制片方法.
- [5] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [6] Cheng H D, Jiang X H, Sun Y, et al. Color image segmentation: advances and prospects [J]. Pattern recognition, 2001, 34(12): 2259-2281.
- [7] Lucchese L, Mitra S K. Color image segmentation: a state-of-the-art survey[J]. Proceedings-Indian National Science Academy Part A, 2001, 67(2): 207-222.

