# 基于改进 Canny 算子的烧结混合料粒度检测方法

张琳琛[1]，刘 颂[2]，李福民[1]，刘小杰[1]，刘 然[1]，吕 庆[1]
(1. 华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210；2. 唐山学院 计算机科学与技术系，河北 唐山 063000)

**摘要：** 在烧结生产中，烧结混合料粒度对含水量、透气性、烧结矿质量等因素都存在影响。针对传统人工方法统计粒度缺乏时效性，导致无法及时反馈统计结果的问题，本文基于智能化、自动化背景，提出能够代替传统人工的烧结混合料粒度的智能检测方法。该方法重点围绕 Canny 算法，搭建新的运算流程，将阈值处理与图像积分融合，并运用距离变换函数提升形态学处理效果。同时，通过同人工标定的结果进行对比发现，应用改进算法对烧结混合料图像进行检测，其对于平均粒度的测定准确率达 90% 以上，能够准确检测烧结混合料的粒度。

**关键词：** 烧结混合料；粒度检测；图像分割；算法改进；机器视觉
**中图分类号：** TF046.4；TP391.41 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0015－10
**doi：** 10.13403/j.sjqt.2022.03.034

## Method for particle size detection of sinter mixture based on improved Canny operator

ZHANG Linchen[1]，LIU Song[2]，LI Fumin[1]，LIU Xiaojie[1]，LIU Ran[1]，LÜ Qing[1]
(1. *College of Metallurgy and Energy，North China University of Science and Technology，Tangshan* 063210，*Hebei*，*China*；2. *Department of Computer Science and Technology，Tangshan College，Tangshan* 063000，*Hebei*，*China*)

**Abstract:** In sinter production，the particle size of sinter mixture has an influence on water content，permeability，sinter quality and other factors. In view of the lack of timeliness of the traditional manual method for statistical particle size，which leads to the inability to timely feedback the statistical results，based on the background of intelligence and automation，an intelligent detection method that can replace the traditional manual particle size of sinter mixture is proposed. The Canny algorithm is focused on，a new algorithm flow is built，the threshold processing is integrated with the image integration，and the distance transformation function is used to improve the morphological processing effect. At the same time，by comparing with the results of manual calibration，it is found that the improved algorithm is used to detect the image of the sintering compound，and the accuracy of the average particle size measurement is up to 90% or more，which can accurately detect the particle size of the sintering compound.

**Key words:** sinter mixture；particle size detection；image segmentation；algorithm improvement；machine vision

烧结混合料粒度是影响烧结矿质量的重要指标之一。近年来，随着原料消耗的增加，高品位矿粉储量减少，矿粉品质变得参差不齐，过粗、过细、难制粒的矿粉增多，严重影响了烧结混合料的制粒效果[1]。因此，钢厂为保证烧结矿质量，及时获取粒度组成，提高其检测效率和准确率，急需寻求实时智能在线反馈制粒效果的方法代替传统的人工筛分检测[2]。

**收稿日期：** 2021－05－25；**修回日期：** 2021－08－03
**基金项目：** 河北省教育厅科学技术研究项目(BJ2021099)；河北省自然科学基金高端钢铁冶金联合基金支持项目(E2019209314)
**作者简介：** 张琳琛(1995—)，男，硕士研究生，从事智能化炼铁方面的研究。
**通讯作者：** 李福民(1971—)，男，博士，教授，从事炼铁理论与工艺方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

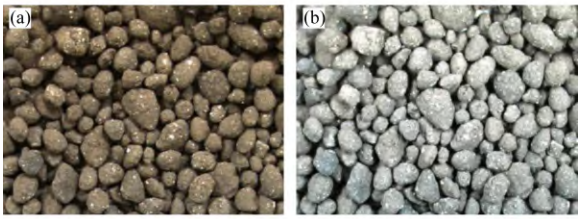
目前，虽然业界对烧结混合料粒度检测的研究并不多，但对原料矿石粒度识别、球团粒度分析、烧结矿粒度测量等已有相关类似研究。董珂[3]基于机器视觉矿石粒度检测技术，提出了多特征融合的多尺度矿石图像分割算法，实现了对矿石粒度参数的定量描述。秦长泽[4]使用改进的自适应标记分水岭算法对球团图像进行分割，并采用 Hough 变换方法对不完整球团进行边缘拟合，使球团粒度的分布状况更加完善。MEBATSION 等[5]提出了一种基于边界曲率的椭圆傅里叶级数逼近的颗粒核分离算法，通过平滑边界轮廓减少局部伪角实现精确分割。但对于内核破坏、边界粗糙的情况，分割效率较低。OMAN 等[6]运用机器视觉技术监控药丸包衣过程，通过梯度边缘检测方法获取候选点药丸球团边界，提取药丸球团图像特征参数确定其粒度，测定包衣过程是否顺利完成。郭常胜等[7]结合图像处理算法，从烧结矿图像中获取特征参数，经过神经网络模式识别，计算出烧结矿粒级，与筛分法所得结果基本吻合。

当前，信息化智能化快速发展，烧结工艺控制水平不断提高，烧结生产过程关键环节的检测手段已逐步完善，从而可获取大量在线数据以参与实时控制[8]。因此，为了提升检测效率，提高烧结混合料质量，本研究将机器视觉应用于烧结混合料粒度检测中，以探寻新的烧结混合料粒度检测方法。

## 1 图像采集

颗粒图像是烧结混合料粒度测定的重要数据来源，本研究从某钢厂 10 批标准配料方案中挑选了 2 批具有代表性的烧结混合料用于颗粒图像采集，获取的两批烧结混合料各具特点。第一批制粒效果好，尺寸接近，颗粒间区分度高；第二批制粒效果差，尺寸差距大，颗粒间区分度低。选取其中一组烧结混合料，在不同光源下采集到的烧结混合料颗粒图像如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，两种光源下采集的颗粒图像的亮度有所差异。为了获得更直观的数据对比结果，需采用图像直方图法进行分析。




(a) 自然光；(b) LED 光源

图 1 不同光源下烧结混合料颗粒图像

Fig. 1 Particle images of sintering mixture under different light sources

## 2 粒度图像选择

### 2.1 图像直方图分析

图像直方图是用以表示数字图像中颜色亮度分布的直方图，标绘了图像中每个颜色通道亮度值的像素个数[9]。图像直方图中，横坐标左侧为纯黑、较暗的区域，右侧为较亮、纯白的区域。因此一张较暗图片的直方图中的数据多集中于左侧和中间部分，而整体明亮、只有少量阴影的图像则相反，两种光源下的图像直方图分析如图 2 所示。对于一张图像，它的 RGB 图像也叫全彩图，包含 3 个通道：红色通道为 R，绿色通道为 G，蓝色通道为 B。对于彩色图像中的一个像素点，3 个通道各自对应一个值，这个值代表各个通道在这个像素点的亮度。

由图 2 可知，自然光源图像直方图 RGB 3 个通道的像素点均集中在 0 ~ 150 区间内，即图像 58% 的部分处于暗色区域内，目标与背景对比度低，不利于识别颗粒轮廓边缘，而 LED 光源图像直方图在 0 ~ 20，120 ~ 170 和 255 附近的区间内均有大量像素点分布，使得暗色区域与明亮区域对比明显，能够更好地分辨每个颗粒的轮廓边缘。对比两个图像直方图分布趋势，自然光源图像中各个通道的像素点数量差距明显，而 LED 光源图像中 3 个通道分布十分相近，更利于通道间数值计算，因此选择了加入光源后采集到的图像做后续处理。为了大幅提高运算效率，提升处理精度，将对确定好的彩色图像进行灰度化处理。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

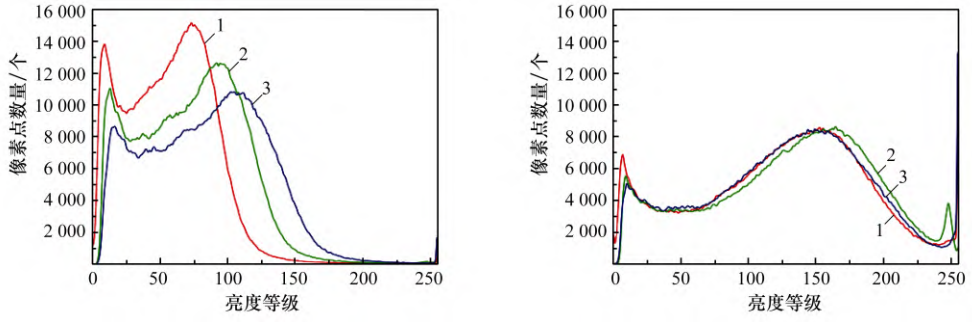



图 2　图像直方图

Fig. 2　Image histogram

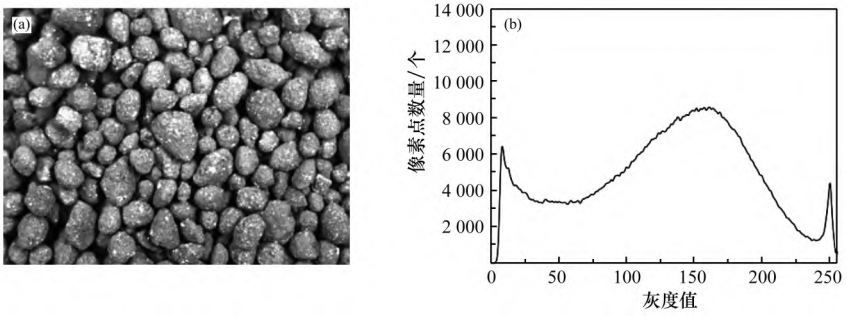
## 2.2　灰度图像分析

灰度图像上每个像素的颜色值称为灰度，即指黑白图像中像素点的颜色深度，范围从 0 到 255，白色为 255，黑色为 0。所谓灰度值是指色彩的浓淡程度，灰度直方图是指一幅数字图像中，对应每一个灰度值统计出具有该灰度值的像素数[10]。图像灰度化处理可以作为图像处理的预处理步骤，灰度图像保留了原图的直方图分布趋势，由 3 个颜色通道处理为单个灰度通道，极大简化了后期运算过程，能更好地提升识别精度与运算效率，为之后的图像分割、图像识别和图像分析等上层操作做准备。图像灰度处理的方法主要有平均值法、最大值法、分量法和加权平均法[11]。本文选择加权平均法进行图像灰度处理。加权平均法是将 3 个通道的亮度值进行加权平均计算，再将加权平均得到的结果作为灰度图像的灰度值，计算方法见式(1)：

$$Gray(i,j) = r \times R(i,j) + g \times G(i,j) + b \times B(i,j);(r+g+b=1) \quad (1)$$

式中：$r$ 为红色通道加权分量；$g$ 为绿色通道加权分量；$b$ 为蓝色通道加权分量。

文中采用加权平均法对图像 RGB 三通道按照 $0.299r+0.587g+0.144b$ 分布进行加权平均灰度处理，处理效果及灰度图像直方图如图 3 所示。




(a) 灰度图像；(b) 直方图

图 3　灰度图像及灰度图像直方图

Fig. 3　Grayscale image and grayscale image histogram

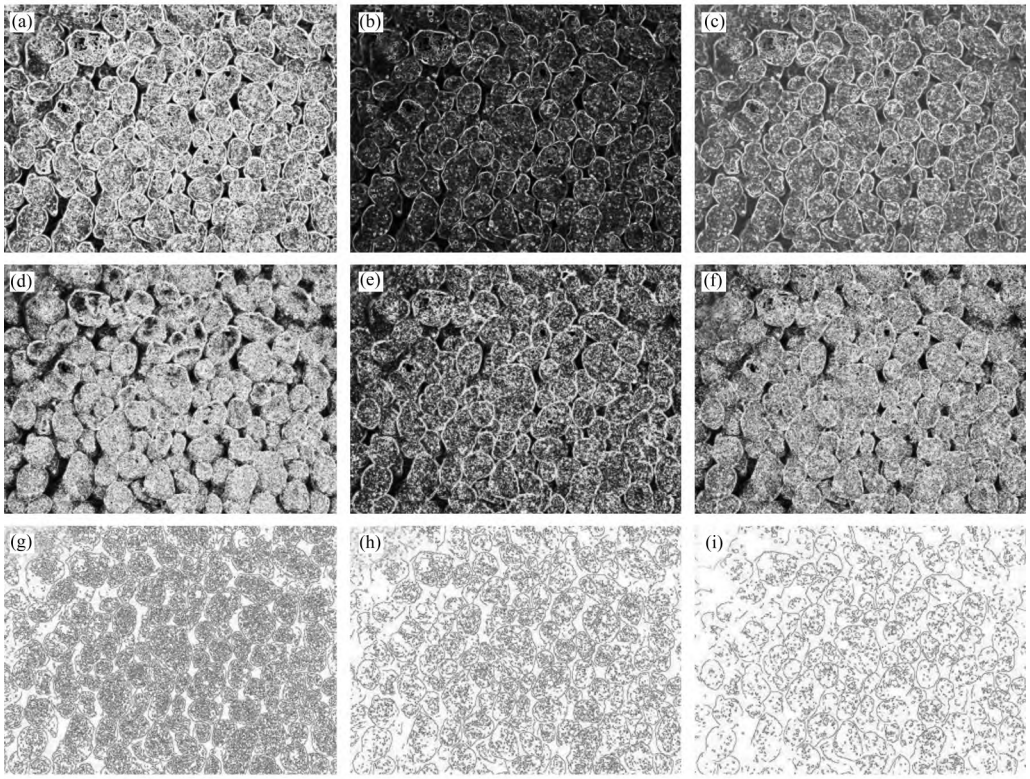
# 3　图像分割算法

图像分割是根据图像特征，如灰度、彩色、几何形状、空间纹理等将图像划分出若干互不相交区域，以体现特征在同一区域的相似性和一致性，以及与不同区域的差异性[12]。自 20 世纪 70 年代起，图像分割问题就由于自身的困难性与重要性吸引了大量研究人员为之努力，时至今日，仍未找到一个完美的通用算法来解决图像分割问题，但是基于其一般性规律，已有多种方法与研究成果取得了广泛应用[13]。

Soble 算子是典型的基于一阶导数的边缘检测算子，依靠离散型差分算子，运算图像亮度函数的梯度的近似值[14]。由于该算子中引入了类似局部平均的运算，因此对噪声具有平滑作用，能很好消除噪声的影响。Laplacian 算子是

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

一种各向同性算子，二阶微分算子，该算子在不考虑周围像素灰度差值时适合计算目标的边缘[15]。Canny 算子是一个具有滤波、增强、检测的多阶段优化算子，它的功能优于前面两种方法，但实现过程较为繁琐[16]。图 4 中比较了 3 种常用算法处理结果。




Soble 算法：(a) *X K size* = 1，*Y K size* = 1，$\alpha=\beta=3$；(b) *X K size* = 3，*Y K size* = 3，$\alpha=\beta=5$；(c) *X K size* = 5，*Y K size* = 5，$\alpha=\beta=7$。Laplacian 算法：(d) *K size* = 1；(e) *K size* = 3；(f) *K size* = 5；Canny 算法：(g) *Min Val* = 60，*Max Val* = 90；(h) *Min Val* = 90，*Max Val* = 150；(i) *Min Val* = 120，*Max Val* = 210

**图 4 算法处理结果**

**Fig. 4 Algorithm processing results**

（注：*X K size* 为 Soble 水平方向算子；*Y K size* 为 Soble 竖直方向算子；$\alpha$，$\beta$ 为融合权重；*K size* 为 Laplacian 算子；*Min Val* 为高阈值；*Max Val* 为低阈值）

由图 4 可知，当 Soble 算法的水平和竖直方向算子取 5，融合权重均取 7 时，分割处理后的图像中颗粒均有较清晰的轮廓边缘；对 Laplacian 算法的算子测试了多个值，但依旧无法得到清晰的轮廓边缘分割图像；Canny 算法低阈值取 60，高阈值取 90 时处理结果描绘了大量颗粒细节轮廓，而取值 120 和 210 时细节轮廓数量虽有明显降低但边缘轮廓也出现了不连续的情况。通过以上分析可知，3 类算子对边缘检测虽然定位准确且速度快，但是均无法保证边缘识别的连续性和封闭性。在处理多细节的密集区域时，存在无法准确分割的问题。所以针对边缘信息的获取，还需要开展算法的调整与优化研究。鉴于 Canny 算法处理效果优于前两种算法，故本文据此提出一种改进的 Canny 算法对烧结混合料进行图像分割。

## 4 改进的 Canny 算法

作为一类多阶段算法，传统 Canny 算法可总结为 6 个步骤：输入图像；高斯滤波降噪；计算边缘梯度；非极大值抑制；滞后阈值；输出二值化图像。改进的 Canny 算法处理步骤：输入图像；双边滤波降噪；改进自适应阈值；形态学优化；距离变换函数；输出二值化图像。

### 4.1 双边滤波

双边滤波是同时考虑将要被滤波的像素点

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的空域信息( Domain) 和值域信息( Range) ，输出像素基于相邻像素的计算权重值进行，而权重函数的系数基于空域内核和值域内核计算而来[17] 。空域内核通常是指高斯内核，而值域内核用于计算相邻像素与中心像素的相似度。原理为一个与空间距离相关的高斯函数和一个与灰度距离相关的高斯函数相乘[18] 。其中空间距离指的是当前点与中心点的欧氏距离，二维空间欧氏距离 $\rho$ 的计算方法如式( 2) 所示，灰度距离 $\Delta_d$ 是指当前点灰度与中心点灰度的差的绝对值，表达式如式( 3) 所示。空域高斯函数 $F(x_i,y_i)$ 表达式如式( 4) 所示，值域高斯函数 $H(x_i,y_i)$ 表达式如式( 5) 所示。

$$\rho=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2} \tag{2}$$

式中: $(x_1,y_1)$ 为两点中其中一点位置; $(x_2,y_2)$ 为另一点位置。

$$\Delta_d=|gray(x_i,y_i)-gray(x_c,y_c)| \tag{3}$$

式中: $gray(x_i,y_i)$ 为当前点灰度值; $gray(x_c,y_c)$ 为中心点灰度值。

$$F(x_i,y_i)=e^{-\frac{(x_i-x_c)^2+(y_i-y_c)^2}{2\sigma_1^2}} \tag{4}$$

式中: $(x_i,y_i)$ 为当前点位置; $(x_c,y_c)$ 为中心点的位置; $\sigma_1$ 为空间域标准差。

$$H(x_i,y_i)=e^{-\frac{\Delta_d^2}{2\sigma_2^2}} \tag{5}$$

式中: $\Delta_d$ 为灰度距离; $\sigma_2$ 为值域标准差。

采用双边滤波法处理后的图像如图 5 所示，其中空间域标准差 $\sigma_1$ 取 60，值域标准差 $\sigma_2$ 取 80。由图 5 可知，图像经过双边滤波法处理后，颗粒细节变得模糊，同时颗粒边缘得到保留，相似区域的灰度梯度更加接近，目标与背景的对比度增强。

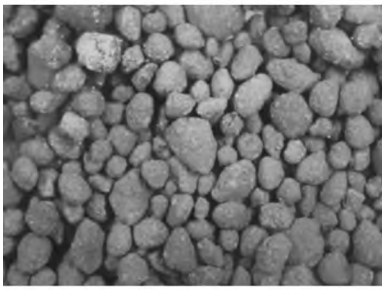
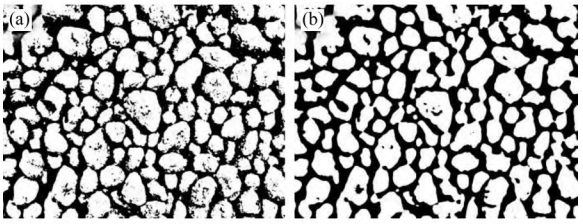


图 5　双边滤波处理结果

Fig. 5　Bilateral filtering results

### 4. 2　改进的自适应阈值

图像的阈值处理就是通过适当的阈值选取，获得可以反映图像整体和局部特征的二值化图像。所有灰度大于或等于阈值的像素会被判定为属于特定物体，并设定其灰度值为 255，否则这些像素点将被排除在物体区域以外，同时灰度值也被设定为 0，表示背景或者例外的区域[19] 。本文基于自适应阈值[20] 的处理原理，提出了一种改进的自适应阈值方法，其在原有基础上加入了一步积分图像处理算法，使得阈值处理效果得到显著提升。改进前后自适应阈值法处理效果如图 6 所示。由图 6 可知，改进后的自适应阈值大幅提升了原算法的处理效果，其既保证了分割效率，又消除了大量因颗粒细节引起的杂乱黑点，使颗粒轮廓更加完整。但是，处理后的图像仍然存在颗粒间的粘连问题，即使开展了大量的算法修改以及参数优化等研究，都无法有效地解决。因此，本文采用形态学处理方法来进一步优化图像的研究。




( a) 自适应阈值; ( b) 改进自适应阈值

图 6　图形处理结果

Fig. 6　Processing results

### 4. 3　形态学优化

数学形态学在定量描述图像的形态特征上具有独特的优势，为基于形状细节进行图像处理提供了强有力的手段[21] 。建立在集合理论基础上的数学形态学主要通过选择相应的结构元素，采用腐蚀、膨胀、开启、闭合 4 种基本运算的组合来处理图像。对改进自适应阈值处理后的二值图像，先进行开运算和闭运算，处理仍然存在的黑色区域和白色细小颗粒，之后在通过若干次腐蚀运算把颗粒间的粘连降到最低，最后通过膨胀操作恢复每个颗粒的原尺寸。研究过程中，使用的是 $3\times3$ 的卷积核，处理循环

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

次数为3次。图6(b)经过形态学处理后的图像如图7所示。由图7可知，经过形态学优化后的图像填补了颗粒上的黑色孔洞，消除了白色细小颗粒，划分开了多个颗粒相互粘连的连通区域，达到了较好的预期效果。对于一些形态学优化无法处理的粘连和细节，需要再通过距离变换函数处理得到最终结果。

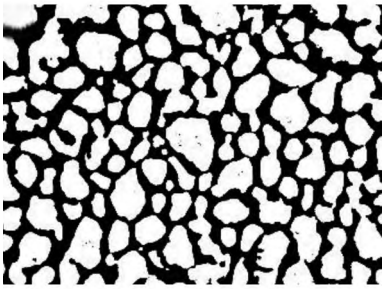
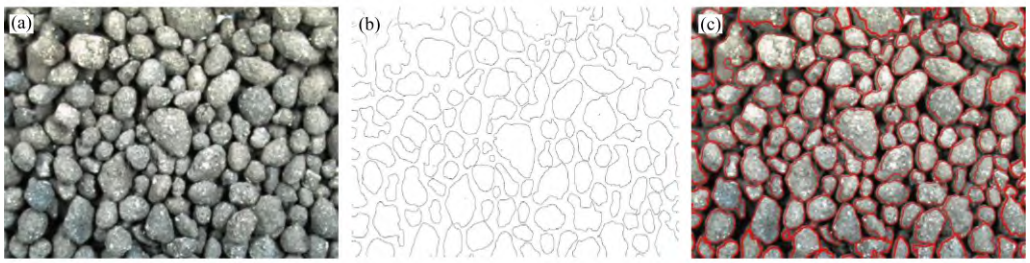


图7 形态学结果

Fig. 7 Morphological results

### 4.4 距离变换函数

图像使用距离变换函数对形态学优化作进一步处理，可提高图像分割的精确程度[22]。距离变换算法的核心是利用两个小的局部掩膜历遍图像。这个算法过程在图像边界需要做出调整，因为在边界处，掩模不能全部覆盖图像，这时可以将掩模中没有对应元素位置的值当作0来处理。距离变换函数处理前后输出的最终二值图像分别如图8(a)、(b)所示，将分割出的轮廓描绘到原图像后得到图8(c)结果。由图8可以看出，改进后的Canny算法能够较为准确地勾勒出图像中大部分颗粒的轮廓，只有少数重度粘连颗粒以及深层掩埋颗粒未得到识别；接下来将机器视觉识别出的烧结混合料粒度与依靠人类视觉进行人工标定的混合料粒度进行对比，检验图像分割算法识别的准确程度。




(a) 原始图像；(b) 分割图像；(c) 轮廓绘制

图8 输出图像

Fig. 8 Output image

## 5 粒度计算

现代常用粒度检测方法有沉降法、筛分法、电感应法、显微镜法等。根据不同的检测原理，获得的粒度参数有平均直径、等效体积直径、等效面积直径、当量直径等。粒度分布的表示也不尽相同，如颗粒个数、百分数、质量百分数等[23]。本研究采用最小外接圆直径表示粒度大小，并采用各粒级所占百分比表示粒度分布。经图像分割处理后，要获得其实际粒度大小，还需要获取分割后全部轮廓的最小闭合外接圆，最小闭合外接圆能够包罗颗粒边界最大扩张区域全部像素点，并且颗粒大小与最小外接圆直径成正比[24]。得到分割区域的轮廓外接圆直径后，不能直接用于统计粒度数据，因为在数字图像中基本单位是像素，还需要将图像中的像素尺寸与实际尺寸通过对应关系进行转化。此时需要对图像分割系统进行系统系数标定，即用一个相对的标准单位对测量对象进行标定，系统系数 $k$ 的计算方法见式(6)：

$$k=\frac{L_{\mathrm{d}}}{L_{\mathrm{p}}} \tag{6}$$

式中：$L_{\mathrm{d}}$ 为标准单位的实际尺寸；$L_{\mathrm{p}}$ 为标准单位的像素尺寸。

使用的标准单位对象为边长10 cm的正方形铁片，以确保不发生轻微形变而影响计算结果，操作过程中要保证拍摄条件完全一致，在获取到图像中的像素数目后，计算得到 $k$ 值。若轮廓外接圆直径的像素点个数为 $N$ 个，那么计算混合料颗粒的实际直径 $R$ 的表达式如

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式(7)所示。由此计算出每个外接圆的直径，即可获得图像分割处理后的实际粒度尺寸分布。

$$R = k \times N \tag{7}$$

### 5.1　图像分割获取粒度尺寸分布

钢厂所取两批试样分别均分为 1－1～1－5 与 2－1～2－5 各五组。经算法处理后得到两批混合料的外接圆直径，根据生产要求分别对1～3、3～5、5～8 和 +8 mm 的粒级占比进行统计，并按照各粒级分布百分比计算加权平均粒度，计算公式见式(8)，统计结果如表 1 所示。

$$\overline{D} = d_2 \times M_2 + d_4 \times M_4 + d_6 \times M_6 + d_8 \times M_8 \tag{8}$$

式中：$\overline{D}$ 为加权平均粒度，mm；$M_2$、$M_4$、$M_6$、$M_8$ 为各粒级占比，%；$d_2$、$d_4$、$d_6$ 分别取各粒级范围中间值 2、4、6 mm，$d_8$ 取 8 mm。

表 1　统计结果

Table 1　Statistical results

| 编号 | 粒级占比/% | | | | 合计/% | 平均粒度/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1～3 mm | 3～5 mm | 5～8 mm | +8 mm | | |
| 1－1 | 17.18 | 19.24 | 32.65 | 30.93 | 100.00 | 5.55 |
| 1－2 | 17.11 | 19.13 | 35.57 | 28.19 | 100.00 | 5.50 |
| 1－3 | 13.06 | 22.68 | 31.62 | 32.65 | 100.00 | 5.68 |
| 1－4 | 13.62 | 24.15 | 34.06 | 28.17 | 100.00 | 5.54 |
| 1－5 | 13.19 | 20.83 | 30.21 | 35.76 | 100.00 | 5.77 |
| 2－1 | 23.04 | 26.18 | 28.01 | 22.77 | 100.00 | 5.01 |
| 2－2 | 25.14 | 26.22 | 23.78 | 24.86 | 100.00 | 4.97 |
| 2－3 | 24.32 | 23.22 | 26.50 | 25.96 | 100.00 | 5.08 |
| 2－4 | 17.76 | 26.23 | 29.23 | 26.78 | 100.00 | 5.30 |
| 2－5 | 19.36 | 27.85 | 27.32 | 25.46 | 100.00 | 5.18 |

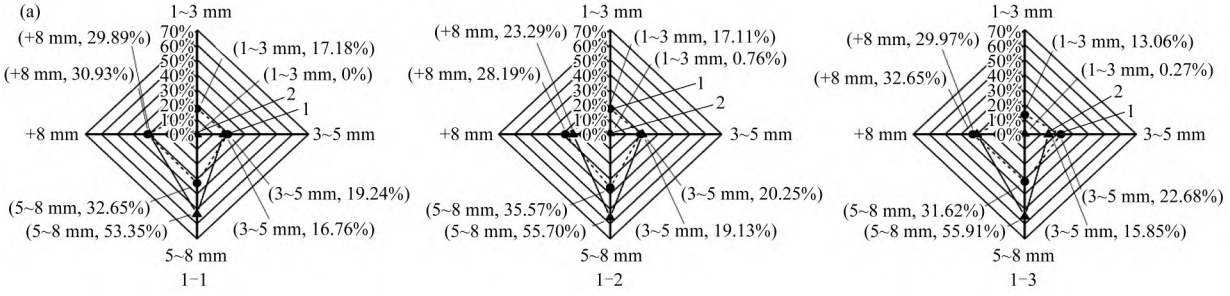
由于图像分割归属于机器视觉，最直观的对比方式是同人类视觉作对比，故此本文采用人工标定的统计结果来评定图像分割统计结果的准确率。并计算平均粒度的误差来评价图像分割统计的平均粒度与人工标定的平均粒度之间的差距，计算方法如式(9)。

$$\text{平均粒度误差} = \frac{\text{图像分割统计的平均粒度} - \text{人工标定统计的平均粒度}}{\text{人工标定统计的平均粒度}} \tag{9}$$

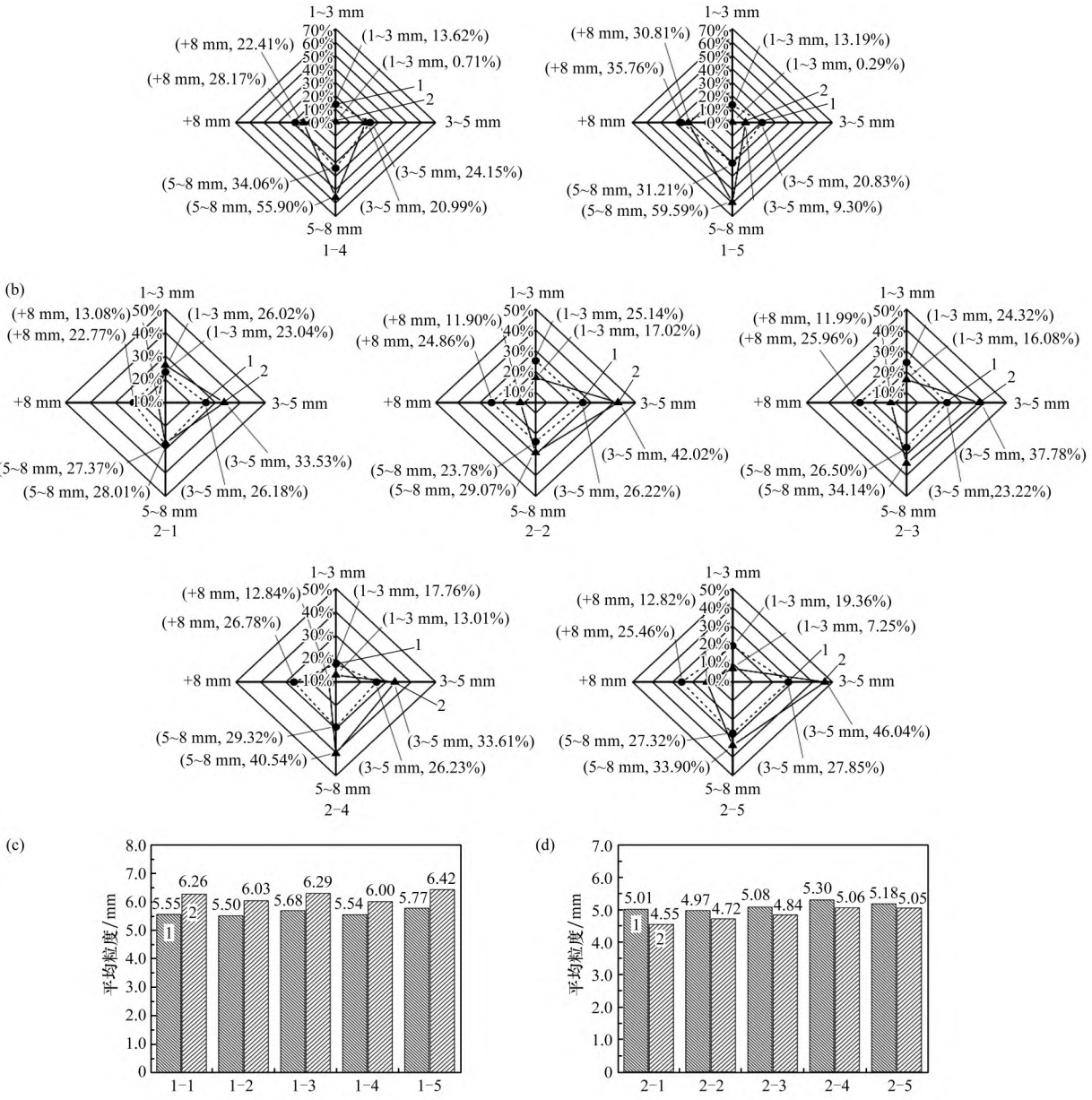
### 5.2　人工粒度标定

人工标定同样采取最小外接圆方式，并借助辅助程序计算出准确最小外接圆直径长度。第一、二批料人工标定与图像分割统计数据对比结果如图 9 所示。

由图 9 可知，与人工标定的结果相比，图像分割识别第一批料的加权平均粒度误差分别为 11.44%、8.85%、9.77%、7.74% 和 10.09%，识别第二批料的加权平均粒度误差分别为 10.11%、5.31%、4.98%、4.67% 和 2.62%，经图像分割算法处理后，大部分误差能控制在 10% 以内。但同时，对比两批料的粒级占比统计结果发现，图像分割和人工标定的结果始终存在一定偏差，虽然两批料粒级占比分布都主




(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net




(a) 第一组粒级占比；(b) 第二组粒级占比；(c) 第一组平均粒度；(d) 第二组平均粒度

1—图像分割；2—人工标定。

**图9 统计数据对比结果**

**Fig. 9 Statistical data comparison results**

要集中在3～5 mm与5～8 mm粒级，但是图像分割处理结果中1～3 mm粒级占比普遍偏高，拉低了粒级占比的整体分布水平。因此，为了使两批料的粒级占比分布更加接近于人工标定水平，同时保证平均粒度误差始终能控制在10%以内，针对两批料的不同粒级分布特点，本文从统计角度出发，为每批料的每个粒级在计算占比结果时加入了一个经验修正系数，并使用新采集的粒度图像开展了粒级占比分析研究。

### 5.3 修正后的粒级分布

在以上10组统计结果的基础上，又继续统计了20余组颗粒图像的粒级占比，从作商、作差、拟合和回归[25]等多种角度分析数据后，初步得到以下经验修正系数，如表2所示。

本文为验证修正效果，对每批混合料又分

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　经验修正系数

Table 2　Experience correction coefficient

| 批次 | 修正系数 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 ~ 3 mm | 3 ~ 5 mm | 5 ~ 8 mm | +8 mm |
| 第一批 | 0. 166 4 | 0. 888 5 | 1. 665 7 | 0. 803 5 |
| 第二批 | 0. 575 5 | 1. 428 8 | 1. 337 8 | 0. 585 7 |

别采集了一组颗粒图像，将图像分割和经验修正的处理结果分别与人工标定结果进行了统计分析，如表 3、4 所示。

由表 3、4 可知，其中 9 组差值均有缩小，一组差值虽增大 1. 04%，但并未对平均粒度造成明显影响。第一批的平均粒度误差由最初的 9. 37% 降低到了 3. 78%，第二批的平均粒度误差由最初的 7. 55% 降低到了 6. 13%，平均粒度误差均有所降低且已经稳定控制在了 10% 以内。分析结果表明，经验修正系数的引入，大幅提高了统计结果准确率，使图像分割处理的粒级占比结果更加接近人工标定的真实值。

表 3　第一批料修正后统计结果

Table 3　Statistical results after correction of the first batch of materials

| 项目 | 粒级占比(质量分数)% | | | | 平均粒度/mm | 平均粒度误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 ~ 3 mm | 3 ~ 5 mm | 5 ~ 8 mm | +8 mm | | |
| 图像分割 | 12. 59 | 24. 83 | 30. 27 | 32. 31 | 5. 65 | 9. 37 |
| 人工标定 | 1. 37 | 15. 34 | 53. 70 | 29. 59 | 6. 23 | — |
| 经验修正 | 2. 08 | 21. 94 | 50. 15 | 25. 82 | 5. 99 | 3. 78 |
| \|图像分割 - 人工标定\| | 11. 22 | 9. 49 | 23. 43 | 2. 72 | — | — |
| \|图像分割 - 经验修正\| | 0. 71 | 6. 60 | 3. 55 | 3. 76 | — | — |

表 4　第二批料修正后统计结果

Table 4　Statistical results after correction of the second batch of materials

| 项目 | 粒级占比(质量分数)% | | | | 平均粒度/mm | 平均粒度误差/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 ~ 3 mm | 3 ~ 5 mm | 5 ~ 8 mm | +8 mm | | |
| 图像分割 | 22. 71 | 26. 87 | 24. 38 | 26. 04 | 5. 07 | 7. 55 |
| 人工标定 | 16. 97 | 42. 06 | 29. 06 | 11. 91 | 4. 72 | — |
| 经验修正 | 13. 16 | 38. 65 | 32. 83 | 15. 35 | 5. 01 | 6. 13 |
| \|图像分割 - 人工标定\| | 5. 75 | 15. 19 | 4. 68 | 14. 13 | — | — |
| \|图像分割 - 经验修正\| | 3. 81 | 3. 41 | 3. 77 | 3. 44 | — | — |

## 6　结　论

(1) 改进的 Canny 算子烧结混合料粒度检测方法能够实现烧结混合料粒度的准确检测，对于烧结混合料平均粒度的测定准确率达 90% 以上。

(2) 基于统计分析得到的不同配料组合下的混合料粒度修正系数，可大幅提高统计结果的准确率，使图像分割处理的粒级占比结果更加接近人工标定的真实值。

参考文献:

[1] 王海风，裴元东，张春霞，等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁，2016，51(1)：1 - 7.
WANG Haifeng，PEI Yuandong，ZHANG Chunxia，et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron and Steel，2016，51(1)：1 - 7.

[2] 郭相君，张良力，贺敬岩，等. 基于模糊 PID 控制的烧结混合料粒度优化[J]. 烧结球团，2019，44(6)：1 - 6；22.
GUO Xiangjun，ZHANG Liangli，HE Jingyan，et al. Optimization of particle size of sintering mixture based on fuzzy PID control[J]. Sintering and Pelletizing. 2019，44(6)：1 - 6；22.

[3] 董珂. 基于机器视觉的矿石粒度检测技术研究[D]. 北京：北京工业大学，2013.
DONG Ke. Research on ore granularity detection technology based on machine vision[D]. Beijing，Beijing University of technology，2013.

[4] 秦长泽. 球团颗粒粒度检测系统研究[D]. 武汉：武汉科

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

技大学,2015.
QIN Changze. Research on the pellet particle size detection system [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2015.

[5] MEBATSION H K,PALIWAL J. A fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images [J]. Biosystems Engineering,2010,108(1):66-74.

[6] OMAN K N,BOSTIAN L. In-line monitoring of pellet coating thickness growth by means of visual imaging [J]. International Journal of Pharmaceutics,2014,470(2):8-14.

[7] 郭常胜,程树森,付朝阳. 基于模式识别的烧结矿粒度测量[C]//2017年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 昆明:中国金属学会,2017:5.
GUO Changsheng,CHENG Shusen,FU Chaoyang. Measurement of sintering ore granularity based on pattern recognition [C]//Proceedings of the 2017 National Annual Conference on Blast Furnace Iron Refining. Kunming: The Chinese Society for Metals,2017:5.

[8] 陈伟,武鹏飞,王宝祥,等. 烧结—高炉炼铁全过程炉料结构智能优化系统[J]. 烧结球团,2020,45(5):8-13;24.
CHEN Wei,WU Pengfei,WANG Baoxiang,et al. Intelligent optimization system of burden structure in the whole process of sintering-blast furnace iron-making [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):8-13;24.

[9] UDDIN K N,ARYA K V,MANISHA P. Histogram statistics based variance controlled adaptive threshold in anisotropic diffusion for low contrast image enhancement [J]. Signal Processing,2013,93(6):1684-1693.

[10] SANBARAN H,SUDIP G,SANTI P M,et al. A new FPGA and programmable SoC based VLSI architecture for histogram generation of grayscale images for image processing applications [J]. Procedia Computer Science,2016,93(9):139-145.

[11] 郭圣文. 图像灰度的处理方法[N]. 计算机世界,2001-05-07(C14).
GUO Shengwen. Processing method of image gray scale [N]. Computerworld Magazine,2001-05-07(C14).

[12] 曹爽. 基于OTSU算法的图像阈值分割技术[D]. 太原:太原理工大学,2018.
CAO Shuang. Image threshold segmentation based on OTSU algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology,2018.

[13] 姜枫,顾庆,郝慧珍,等. 基于内容的图像分割方法综述[J]. 软件学报,2017,28(1):160-183.
JIANG Feng,GU Qing,HAO Huizhen,et al. Survey on content-based image segmentation methods [J]. Journal of Software,2017,28(1):160-183.

[14] ZAI Q,GUO H,CHEN L P. Research on remote sensing image fusion methods based on soble operator wavelet packet transform [J]. Journal of Convergence Information Technology,2013,8(7):300-306.

[15] 毛义坪,马茂源. 基于高斯拉普拉斯算子的多聚焦图像融合[J]. 计算机应用与软件,2019,36(10):216-221.
MAO Yiping,MA Maoyuan. Multifocus image fusion based on gaussian laplacian [J]. Computer Applications and Software,2019,36(10):216-221.

[16] ARCHANA P,KARUNAKAR B. Image segmentation using improved canny algorithm and mathematical morphology [J]. Journal of Innovation in Electronics and Communication Engineering,2018,8(2):48-53.

[17] LI X S,ZHOU F Q,TAN H S,et al. Multimodal medical image fusion based on joint bilateral filter and local gradient energy [J]. Information Sciences,2021,569:302-325.

[18] PIAO W,YUAN Y,LIN H. A digital image denoising algorithm based on gaussian filtering and bilateral filtering [J]. ITM Web of Conferences,2018,17:01006-01006.

[19] BATAINEH B. A fast and memory-efficient two-pass connected-component labeling algorithm for binary Images [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science,2019(2):1243-1259.

[20] MAHMOOD M T,SIDDIQUI S A,CHOI Y K. Blur detection through multinomial logistic regression based adaptive threshold [J]. Journal of the Semiconductor & Display Technology,2019,18(4):110-115.

[21] MOHANAN N,AHMAD A,AIBUSAIDI S S,et al. Use of mathematical morphology in vehicle plate detection [J]. Oriental Journal of Computer Science and Technology,2018,11(4):195-200.

[22] 张黎黎,王军民,陈璨. 基于Open CV距离变换的物体计数系统研究[J]. 电子测量技术,2019,42(21):97-100.
ZHANG Limin,WANG Jumin,CHEN Can. Research on object counting system based on open CV distance transform [J]. Electronic Measurement Technology,2019,42(21):97-100.

[23] ZHAN Y T,ZHANG G Y. Ore particle size classification model based on bi-dimensional empirical mode decomposition [J]. Multimedia Tools and Applications: An International Journal,2020,79(1):4847-4866.

[24] 张新天. 图像识别技术在炼铁原燃料粒度检测中的应用[J]. 现代冶金,2019,47(5):55-59.
ZHANG Xintian. Application of image recognition technology in granticle detection of ironogen fuel [J]. Modern Metallurgy. 2019,47(5):55-59.

[25] BRYAN L R,MONICA R L. Principles of statistics [J]. Clinics in Sports Medicine,2018,37(3),357-386.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net