基于图像增强的球团粒度检测方法

张学锋[a]，祝忠阳[a]，黄永鹤[a]，余正伟[b]，龙红明[b]
（安徽工业大学 a. 计算机科学与技术学院；b. 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：为解决球团生产过程中无法准确、即时获取球团粒度信息的问题，针对现有检测球团粒度检测方法的研究存在的不足，本文提出了一种基于图像增强的球团粒度检测方法。该方法使用工业相机获得实时球团图像后，结合 Log 变换的改进带色彩恢复的多尺度视网膜增强算法（MSRCR）进行图像增强，通过引导滤波在保留球团边缘信息的同时去除噪声，使用引入阈值分割的霍夫变换，快速检测出图像中球团的个数，计算并统计每个球团的粒度。结果表明：该方法对球团个数检测的准确度达到 92.03%，对合格球个数的检测准确度达到 91.25%，能够满足球团工艺生产的要求。研究结果对减轻工人劳动强度、提高球团生产效率以及合格率具有积极作用。

关键词：粒度检测；图像增强；MSRCR 算法；Log 变换；引导滤波；霍夫变换
中图分类号：TF046.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764（2024）03－0081－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.045

Pellets particle size detection method based on image enhancement

ZHANG Xuefeng[a], ZHU Zhongyang[a], HUANG Yonghe[a], YU Zhengwei[b], LONG Hongming[b]
(Anhui University of Technology a. School of Computer Science and Technology;
b. School of Metallurgical Engineering, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: In order to solve the problem that pellets particle size information cannot be obtained accurately and instantaneously in the production process of pellets, a particle size detection method for pellets based on image enhancement is proposed after the study of the existing detection methods for particle size of each pellet. In this method, the real-time pellets image is obtained by using an industrial camera, in view of the characteristics of low brightness and high noise of the acquired images, the improved Multi-scale Retinal Enhancement Algorithm with Color Recovery (MSRCR) combined with Log transform is used for image enhancement; and then, through guided filtering, the noise is removed while retaining the information at the edge of pellets; finally, the Hough transform of introduced threshold segmentation is used to quickly detect the number of pellets in the image, and then calculate and count the particle size of each pellet. The results show that the accuracy of the method for the detection of the number of each pellet is 92.03%, and the accuracy of the detection of the number of each qualified pellet is 91.25%, which can meet the requirements of pellets production. The results have a positive effect on reducing the labor intensity of workers, and improving the production efficiency of pellets and the pass rate.

Key words: particle size detection; image enhancement; MSRCR algorithm; Log transform; guided filtering; Hough transform

收稿日期：2023－04－31；**修回日期：**2023－06－13
基金项目：安徽高校自然科学研究项目（KJ2019A0063；2022AH050290）
作者简介：张学锋（1978—），男，教授，从事计算机仿真研究。
通信作者：余正伟（1984—），男，博士，副教授，从事冶金智能化与低碳冶金领域方面的研究。

造球工序是球团生产的核心基础工序，也是保证球团产量和质量的关键工序。球团的质量可从多方面进行衡量，如球团粒度、密度、大小以及形状等，其中最重要的是球团粒度[1]。合适的粒度和分布是保障球团质量的重要指标[1]。目前，球团的粒度检测主要依靠人工[3]。人工检测具有效率低，准确率差的缺点，严重影响球团的生产质量[4]。而实现造球工艺智能化的关键问题是精准实时地检测球团的粒度信息[5]。目前已有部分相关研究：温春友等[6]使用数字图像处理技术，可大体检测出球团的粒度分布；张泽琳等[7]通过形态学边缘检测技术，顺利检测煤矿的粒度分布；夏召红等[8]使用小波变换和边缘检测，较为真实地反映出球团的粒度；王如雪等[9]通过对图像进行预处理，得到前景图像和背景图像，再使用改进分水岭算法，统计出矿石的粒度分布；唐庆博等[10]提出一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法，节省了 Hough 变换的运算时间。但目前，球团的粒度检测仍存在准确度不高和即时性不强的问题，并导致最终的检测结果不佳。

基于以上研究，本文设计了一种基于图像增强的球团粒度检测方法。该方法利用高速相机在造球盘出球口获取球团图像，使用结合 Log 变换的改进 MSRCR 算法进行图像增强，再通过引导滤波去除噪声，最后采用引入了阈值分割的 Hough 变换检测出球团，得到图像中的球团粒度信息，从而提高球团粒度检测的精准度和球团生产质量。

1 检测系统与流程

1.1 系统组成

球团检测系统主要包括摄像系统、保护装置、光源以及工控机等设备。球团生产时，造球盘内球团运动速度快、堆叠程度高、识别困难。出球区则是生产出的球团转移至下一道工艺的中间区域，球团在出球区内运动速度有所下降，堆叠程度不高，适合摄像系统获取球团图像。获取到的图像会被传输到工控机，由处理系统进行图像处理和分析，得到球团的粒度信息。

球团图像获取装置如图 1 所示。摄像机安装在出球口上方，并设有保护装置和光源。出球口背景为白色且设有一定倾斜角度，在提高球团对比度的同时，也降低了球团堆叠的可能性，有利于提高检测球团粒度的精准度。该系统装置可完成对球团图像的采集，并通过转换机将图像信息传输到工控机，供检测系统软件对球团粒度信息进行检测。

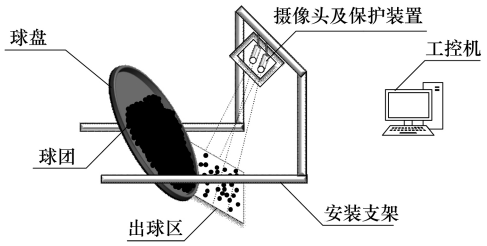


图 1 球团粒度检测系统装置结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of the device structure for ball particle size detection system

1.2 检测流程

检测系统实时显示摄像系统获取的当前球团图像，使用计算机视觉技术对其进行处理。先对图片进行图像增强，凸显球团特征，然后使用引导滤波过滤噪声，再通过霍夫变换识别出球团，最后计算出球团粒度信息。系统绘制出球团粒度信息的折线图，反应当前球团的生产情况，并将粒度信息显示在用户界面和保存到数据库。系统软件工作流程如图 2 所示。

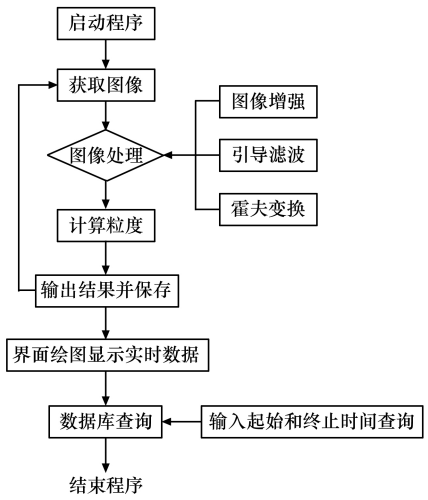


图 2 系统工作流程

Fig. 2 System workflow

根据图 2 所示，启动程序后，实时图像界面会显示当前获取的图像，并通过图像处理模块对该图像进行检测，获取图片中球团的平均粒度和

球团个数，统计出不同粒度区间内的球团大小，即 < 8 mm 的小球，[8,20] mm 的合格球以及 >20 mm的大球各自所占的比重，以此来计算球团生产的合格率，并将这些数据显示在用户界面和保存入数据库。增加鼠标响应函数，帮助现场人员更好地观察某一时刻的球团生成情况，同时支持查询某一时间段内的生产状况，方便现场工作人员的观察，减少主观失误，现场工作人员可以根据生成情况决定原料的增减。

2　图像处理方法与结果分析

本文先对图片进行图像增强，凸显球团特征，然后再使用引导滤波过滤噪声，最后通过霍夫变换识别出球团并计算粒度信息。

2.1　图像增强

常见的图像增强算法如伽马变换、直方图均衡化等，并不适合处理亮度偏低的球团图像。本文使用结合 Log 变换的改进 MSRCR 算法，对球团图像进行增强。

2.1.1　MSRCR 算法

MSRCR 算法是 Retinex 理论算法中的一种[11]。Retinex 理论的核心内容是物体不受光照非均性的影响，在颜色上具有一致性[12]。Retinex 理论在图像除雾和对低亮度图像的增强方面有着较好的效果[13]，其理论数学表达式见式(1)。

$$S(x,y)=R(x,y)L(x,y) \tag{1}$$

式中：$S(x,y)$为人眼或者摄像头获取到的图像；$R(x,y)$为物体的反射分量；$L(x,y)$为入射分量。Retinex 理论的思想是通过式(1)，将入射分量 L 去除，并计算出反射分量 R，以此达到图像增强的效果。

对式(1)两边同时取对数，就能够去除入射分量的影响，得到观测物体的本来面貌，关系式见式(2)。

$$\log[S(x,y)]=\log[L(x,y)]+\log[R(x,y)] \tag{2}$$

由式(2)得

$$\log[R(x,y)]=\log[S(x,y)]-\log[L(x,y)] \tag{3}$$

由式(3)可知，在图像 S 已知的情况下，想要得到反射分量 R，只需要估计出亮度分量 L 即可。通过高斯滤波，能够很好地从 S 中估计出 L，即

$$L(x,y)=S(x,y)*G(x,y) \tag{4}$$

式(4)中：‘ * ’为卷积操作；$G(x,y)$为高斯卷积函数，表达式见式(5)。

$$G(x,y)=k\mathrm{e}^{\left(\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right)} \tag{5}$$

式中：σ 为高斯函数尺度参数，σ 值偏小时颜色失真程度大，细节恢复效果好，反之则颜色失真程度小，细节恢复效果差；k 为归一化因子，使 $\iint G(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y=1$。对于 RGB 彩色图像的某一个通道，有如下关系式：

$$\log[R_c(x,y)]=\log[S_c(x,y)]-\log[S_c(x,y)*G(x,y)] \tag{6}$$

式中：c 为 RGB 三个通道的某一个通道。

计算出 $\log[R(x,y)]$后，将其从对数域转换到实数域，并进行量化处理，将 $R(x,y)$值的范围拉伸为 0 到 255，并转换为相应的格式，即可得到输出图像 $R(x,y)$。这是 Retinex 图像增强算法中，最基础的单尺度 Retinex(Single Scale Retinex，SSR)算法。

具有色彩恢复的多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex with Color Restoration，MSRCR)算法在 SSR 算法的基础上发展而来。对 $S(x,y)$的每一个通道都进行 3 次高斯滤波，且每次高斯滤波的尺度不同，再加权求和，即可得到多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex，MSR)算法。在 MSR 算法中引入色彩恢复因子，即可得到 MSRCR 算法，能够调节图像中一些局部区域因对比度增强引起的颜色失真问题[14]。

MSR 算法的计算公式见式(7)。

$$\log[R(x,y)]=\sum_k^K w_k\{\log[S(x,y)]-\log[S(x,y)*G_k(x,y)]\} \tag{7}$$

式中：K 为高斯卷积函数的个数；w_k 为不同尺度的权重。引入色彩恢复因子得到 MSRCR 算法，有如下关系式：

$$R_{\mathrm{MSRCR}_i}(x,y)=C_i(x,y)R_{\mathrm{MSR}_i}(x,y) \tag{8}$$

$$C_i(x,y)=f[I'_i(x,y)]=f\left[\frac{I'_i(x,y)}{\sum_{j=1}^N I_j(x,y)}\right] \tag{9}$$

$$f[I'_i(x,y)] = \beta\log[\alpha I'_i(x,y)] = \beta\{\log[\alpha I'_i(x,y)] - \log[\sum_{j=1}^{N} I_j(x,y)]\} \quad (10)$$

式(8)~(10)中：C_i 为第 i 个通道的色彩恢复因子；$I_i(x,y)$ 为第 i 个通道的图像；$f(\cdot)$ 为颜色空间的映射函数；β 为增益常数；α 为受控制的非线性强度，用来调节图像亮度。

MSR 算法以及 MSRCR 算法对同一张球团图片的图像增强效果如图 3 所示。

由图3 可知，相较于 MSR 算法，MSRCR 算法的增强效果更好，整体上球团与背景的对比度更高。但 MSRCR 算法仍存在一些缺陷，例如在灰度值差异较大的过渡区容易出现光晕现象，低灰度值区域增强效果仍有所不足，局部细节色彩失真以及边缘锐化不足等。这些问题表现在球团图像上为球团轮廓被放大，边缘信息缺失、失真。本文提出一种结合 Log 变换的改进 MSRCR 算法，以改善光晕及失真现象，令图像增强后的球团粒度检测更加精准。

2.1.2 Log 变换

Log 变换后的图像，在低灰度值区域的对比度会得到提升，即 Log 变换能够增强图像的低灰度区域细节。

Log 变换的原理是通过对数运算，压缩图像高灰度值区域的像素，扩展图像低灰度值区域的像素，这样便能够表现出图像低灰度值区域的更多细节，达到增强图像低灰度值区域的目的。Log 变换数学表达式见式(11)。

$$s = c\log(a + r) \quad a > 0, r \geqslant 0 \quad (11)$$

式中：s 为图像在 Log 变换后的每个像素点值；c 为常数；a 为对像素进行扩展的控制参数；r 为未经 Log 变换前图像的每个像素点值。

2.1.3 结合 Log 变换的改进 MSRCR 算法

在求式(3)中的反射分量 $R(x,y)$ 前，先对观察到的图像 $S(x,y)$ 进行 Log 变换，令图像在灰度值变化较大的边缘区域，光照变化更加平滑，同时改善在低灰度值区域的增强效果。数学表达式见式(12)。

$$S_{\mathrm{Log}}(x,y) = c\log[a + S(x,y)] \quad (12)$$

进行 Log 变换后，进行归一化处理，将 $S_{\mathrm{Log}}(x,y)$ 值的范围拉伸为 0~255，得到归一化后的图像 $S_{\mathrm{norm}}(x,y)$，再求反射分量 $R(x,y)$，则式(7)应变为式(13)。

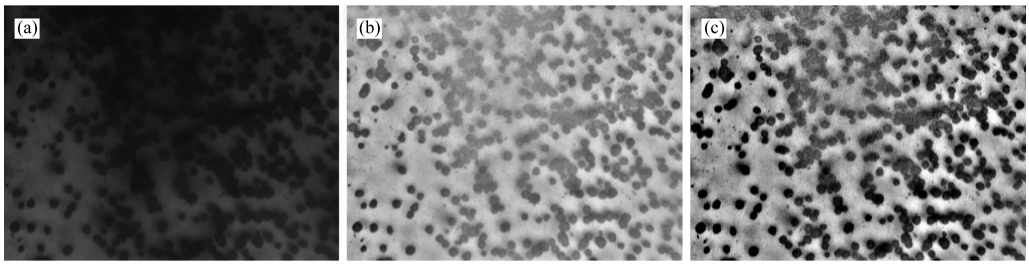
$$\log[R(x,y)] = \sum_k^K w_k\{\log[S_{\mathrm{norm}}(x,y)] - \log[S_{\mathrm{norm}}(x,y) * G_k(x,y)]\} \quad (13)$$

本文算法与其他图像处理算法，对同一张球团图像的处理效果对比如图 4 所示。

由图 4 对比可知，直方图均衡化和伽马变换也能起到图像增强的作用，但在低灰度区域增强效果不明显，球团轮廓信息不突出，与背景的对比度不高，不如 MSRCR 算法和本文算法。

改进分水岭算法常用于图像的边缘分割，当球团图像亮度较低，灰度值分布不均时，球团与背景的分割难度大，改进分水岭算法处理效果一般，未能完全将球团与背景分割。小波变换能够提高背景灰度值，降低球团灰度值，起到凸显球团的作用，但与直方图均衡化以及伽马变换效果存在相似的问题，在图像中的低灰度区域，球团与背景的对比度不高。

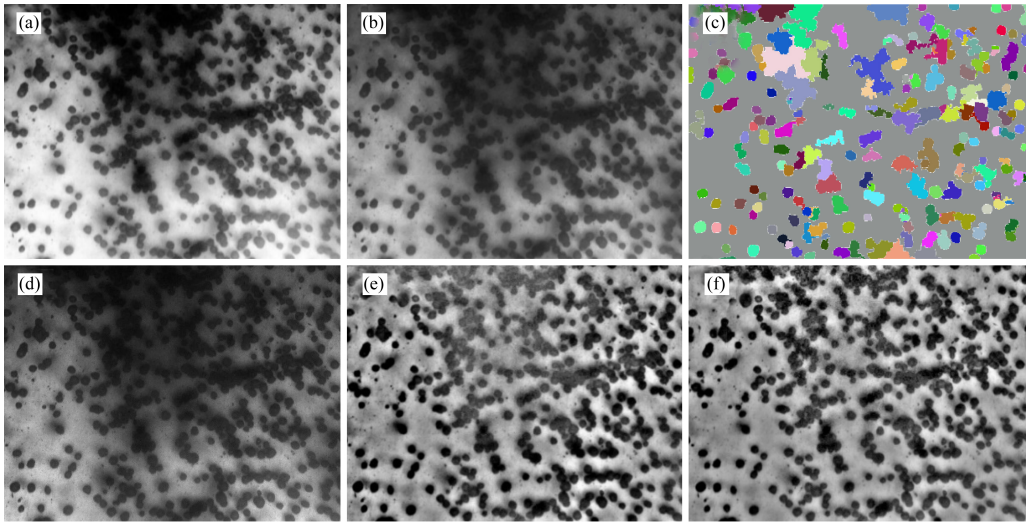
而相较于 MSRCR 算法，本文算法在原球团图像中的较高灰度区域减少了球团边缘的黑色光晕，使图片中的球团轮廓与真实情况更接近，同时在低灰度区域提高了球团与背景的对比度，有利于



（a）原图；（b）MSR；（c）MSRCR

图 3 MSR 与 MSRCR 增强效果

Fig. 3 Enhancement effect of MSR and MSRCR



（a）直方图均衡化；（b）伽马变换；（c）改进分水岭；（d）小波变换；（e）MSRCR；（f）本文算法

图 4　不同算法处理效果

Fig. 4　Effects of different algorithms

后续位于该区域球团粒度的检测。

2.2　引导滤波

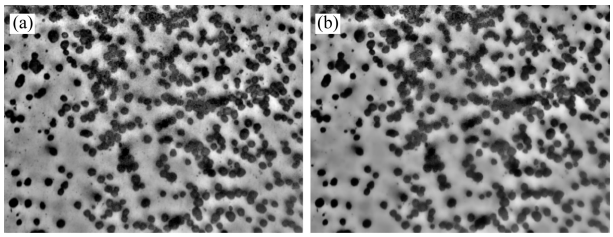
引导滤波即需要引导图的滤波器。引导滤波使用局部线性模型，将图像看成一个二维函数，并假设在一个二维窗口内，引导函数的输入和输出满足线性关系，其理论数学表达式如下：

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \tag{14}$$

$$q_i = p_i - n_i \tag{15}$$

式(14)、(15)中：q 为输出图像；I 为引导图像；p 为输入图像；ω 为局部窗口；k 为窗口的中心点；n 为噪声。任何一个属于局部窗口 ω_k 的像素点，都能够在引导图像中对应像素点的基础上，根据(a_k, b_k)的系数加以变换运算得到。又因输入图像可以由输出图像与无用的噪声相加得到，所以有关系式$p = q + n$。

引导图像可以是单独的图像，也可以是输入图像，当引导图像是输入图像时，引导滤波具有良好的保持边缘效果[15]。对经过本文算法增强了的球团图像进行引导滤波，效果如图 5 所示。



（a）引导滤波前；（b）引导滤波后

图 5　引导滤波效果

Fig. 5　Effect of guided filtering

由图 5 可看出，引导滤波在去除图片中噪声和背景污点的同时，对球团边缘的轮廓信息进行了很好的保留。

2.3　引入阈值分割的霍夫变换

对出球区的球团图片采用本文算法进行图像增强和引导滤波后，采用霍夫变换对图像进行圆检测。对于类圆形物体的检测，霍夫变换是个很好的选择，可以很好地应用在球团粒度检测领域[11]。

霍夫圆变换首先检测出类圆物体的中心，通过 Canny 边缘检测计算出图像梯度，确定中心位置；接着检测半径大小，计算出类圆物体中心位置到轮廓边缘的距离，得到半径；重复上述步骤，即可得到图片中所有类圆物体的数量和对应的半径。若把所有类圆物体都看作球团，便得到了图片中球团的数量及相应的粒度。

但霍夫圆变换也可能会将部分背景检测为圆形物体，这会影响球团检测的准确度。为确保检测结果的精准性，在霍夫圆变换中引入阈值分割。根据图像中球团和背景的灰度值，设立一个阈值。

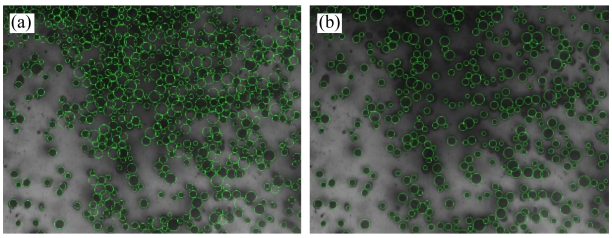
若类圆物体中心位置的灰度值低于阈值，说明该类圆物体为球团，可计算并统计其信息，若灰度值高于阈值，则说明该类圆物体是背景的一

部分，不计算统计其信息。数学表达式如下：

$$\begin{cases} n = n_{\text{org}} + 1, r_n = f(x,y) & k < t \\ n = n_{\text{org}} & k \geqslant t \end{cases} \tag{16}$$

式中：n 为当前检测出的球团个数；n_{org} 为上一次检测到类圆物体时的球团个数；r 为球团半径；$f(x,y)$ 为半径计算函数；k 为类圆物体中心位置的灰度值；t 为分割球团和背景的灰度值阈值。

对引导滤波后的图像进行引入阈值分割的霍夫圆变换，并在原球团图片上，将检测到的球团圈出，效果如图 6 所示。



（a）无阈值分割；（b）有阈值分割

图 6 霍夫变换检测效果

Fig. 6 Detection effect of Hough transform

由图 6 可知，对引导滤波后的球团图像进行检测时，无阈值分割的霍夫变换将部分背景也识别成了类圆物体，而引入阈值分割的霍夫变换能够大幅减少对背景的误检测，增加球团检测的准确度。

对经过不同步骤处理的同一球团图片，进行引入阈值分割的霍夫变换，并将检测到的球团在处理后的图片上圈出，效果如图 7 所示。

由图 7 可知，MSRCR 处理后的检测存在误检现象，噪点和背景易被识别为类圆物体，且球团边缘存在光晕，导致检测到的球团粒度偏大，影响检测准确度。本文算法处理后的图像中，球团与背景的对比度得到提高，避免了将背景识别为类圆物体，同时有效改善了光晕现象，使检测到的球团轮廓向实际轮廓贴近。本文算法处理且引导滤波后，图像中的噪点和背景污点被过滤，避免了将噪点识别为类圆物体，同时保留了球团的边缘信息，进一步使检测到的球团轮廓贴近真实轮廓，提高球团粒度检测准确度。

使用不同算法处理球团图像，其中直方图均衡化，伽马变换，MSRCR 以及本文算法均使用了引导滤波，引入阈值分割的霍夫变换，能够检测出的球团数量如表 1 所示。

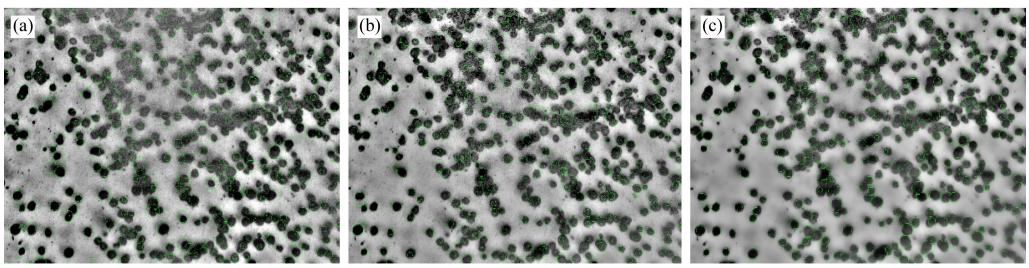
进一步对每张图像中，不同算法下识别到的球团进行粒度分析，并统计不同粒度范围的球团个数，得到位于［8，20］mm 范围内的合格球团数量如表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知，直方图均衡化，伽马变换以及小波变换对球团图片进行增强后，球团的检测效果并不理想。改进分水岭对灰度值低且分布不均的球团图片分割效果一般，检测结果不佳。

表 1 不同算法下的球团数量

Table 1 Number of pellets under different algorithms

图片编号	直方图均衡化	伽马变换	改进分水岭	小波变换	MSRCR	本文算法	真实个数
1	107	124	146	178	362	368	401
2	42	45	195	96	325	335	360
3	82	139	203	194	372	391	418
4	101	152	186	176	376	397	425
5	91	98	217	164	405	428	471
6	70	128	171	159	330	385	418
7	89	65	163	138	397	459	515
8	112	161	184	212	383	412	456
9	69	179	167	166	392	419	450
10	93	99	229	192	296	297	314



（a）MSRCR 处理后；（b）本文算法处理后；（c）本文算法处理且引导滤波后

图 7 不同步骤处理的检测效果

Fig. 7 Detection effects processed by different steps

表 2　不同算法下的合格球数量

Table 2　Number of qualified pellets under different algorithms

图片编号	直方图均衡化	伽马变换	改进分水岭	小波变换	MSRCR	本文算法	真实个数
1	95	107	134	159	314	337	366
2	39	35	182	87	266	294	329
3	71	112	185	171	313	341	384
4	96	128	167	159	316	365	392
5	88	87	196	137	354	397	425
6	60	106	157	139	267	335	379
7	82	54	148	115	347	408	449
8	105	129	163	189	320	373	405
9	58	142	154	148	326	382	417
10	87	88	207	175	245	274	296

当图像中球团个数较少或图像亮度偏高时，MSRCR 算法与本文算法处理后的检测效果相差不大，当图像中球团个数偏多或图像亮度较低时，本文算法处理后的检测效果优于 MSRCR 算法，检测出的球团个数与真实个数更接近，对球团和合格球个数的检测平均准确率分别达到 92.03% 和 91.25%。

3　结　论

（1）针对球团粒度检测，本文开发了一套稳定的球团粒度检测系统。系统主要由球盘、摄像系统及其保护装置和工控机等组成，通过对摄像系统采集到的实时球团图像进行图像增强、引导滤波、阈值分割、霍夫变换以及粒度分析，可实现球团粒度的实时在线自动检测。

（2）与人工筛选检测相比，系统检测更加快捷、精准，排除了主观误差，并且具有实时性。同时，系统能够将球团粒度信息显示在用户界面，并存入数据库中，支持查询历史生产过程中的球团信息。

（3）本文算法相较于其他图像增强算法，在后续的球团粒度检测中，检测效果更优，能够较为准确地反映生产中的实时粒度分布情况，对提高球团生产合格率和降低现场工人劳动强度有积极意义。

参考文献：

[1] 毛传刚. 基于机器视觉的圆盘造球机生球粒径在线检测方法研究[D]. 长沙：湖南大学，2019.
MAO Chuangang. Machine vision based method for on-line measurement of the pellet size in disc pelletizer [D]. Changsha：Hunan University，2019.

[2] 叶匡吾. 我国球团生产的现状和展望[J]. 烧结球团，2003，28(1)：1－4.
YE Kuangwu. Prospect and present situation of pellet production in China[J]. Sintering and Pelletizing，2003，28(1)：1－4.

[3] 覃德波，陈天宇，余正伟，等. 基于图像增强的生球粒度识别方法研究[J]. 烧结球团，2021，46(6)：82－88.
QIN Debo，CHEN Tianyu，YU Zhengwei，et al. Research on recognition method of fresh pellets particle size based on image enhancement[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：82－88.

[4] 王纪元，阎丽娟. 球团质量分层综合评价方法研究[J]. 烧结球团，2015，40(3)：17－21.
WANG Jiyuan，YAN Lijuan. Study on stratified comprehensive evaluation method of pellet quality[J]. Sintering and Pelletizing，2015，40(3)：17－21.

[5] 孙彦光. 钢铁工业数字化、网络化、智能化制造技术发展路线图[J]. 冶金管理，2015(9)：4－8.
SUN Yanguang. Iron and steel industry digital，networked，intelligent manufacturing technology development roadmap[J]. China Steel Focus，2015(9)：4－8.

[6] 温春友，邵志勇. 基于数字图像处理的球团矿粒度检测[J]. 烧结球团，2004，29(2)：38－40.
WEN Chunyou，SHAO Zhiyong. A measuring method of pellets diameter based on digital image processing[J]. Sintering and Pelletizing，2004，29(2)：38－40.

[7] ZHANG Zelin，YANG Jianguo. Estimation of coal particle size distribution by image segmentation[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2012(22)，739－744.

[8] 夏召红，谢元旦，马英海，等. 基于小波变换的球团矿粒度检测[J]. 科技信息(科学教研)，2007(35)：101－102.
XIA Zhaohong，XIE Yuandan，MA yinghai，et al. An online-measurement method of pellets diameter based on wavelet transform[J]. Science & Technology Information，2007(35)：101－102.

[9] WANG R，ZHANG W，SHAO L，et al. Research of ore

particle size detection based on image processing[C]// Proceedings of 2017 Chinese Intelligent Systems Conference. Mudanjiang: Chinese Association for Artificial Intelligence, 2017: 505 – 514.

[10] 唐庆博,唐超,张恒浩. 一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法[J]. 航空计算技术,2017,47(3): 58 – 61.
TANG Qingbo, TANG Chao, ZHANG Henghao. An improved circle detection method based on hough transform[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(3): 58 – 61.

[11] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1 – 11.

[12] 王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学,2017,10(4): 438 – 448.
WANG Hao, ZHANG Ye, SHEN Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms [J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 438 – 448.

[13] 王萍,孙振明. 多级分解的 Retinex 低照度图像增强算法[J]. 计算机应用研究,2020,37(4): 1204 – 1209.
WANG Ping, SUN Zhenming. Multi-level decomposition Retinex low-light image enhancement algorithm[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1204 – 1209.

[14] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODELL G A. A multi-scale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965 – 976.

[15] MA J X, FAN X N, NI J J, et al. Multi-scale Retinex with color restoration image enhancement based on Gaussian fltering and guided fltering[J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31: 16 – 19.

[16] 张学锋,陈天宇,储岳中,等. 基于霍夫变换的烧结矿粒度识别研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(6): 118 – 124.
ZHANG Xuefeng, CHEN Tianyu, CHU Yuezhong, et al. Study on particle size identification of sinter based on hough transform [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(6): 118 – 124.

(上接第59页)

[7] 刘征建,左海滨,张建良. 烧结机尾特征断面图像采集算法的研究及应用[J]. 钢铁,2008. 43(3): 21 – 24.
LIU Zhengjian, ZUO Haibin, ZHANG Jianliang. Research and Application of Image Acquisition Algorithm for Characteristic Section of Sintering Machine Tail[J]. Iron and Steel, 2008. 43(3): 21 – 24.

[8] 刘博,王胜正,赵建森,等. 基于 Darknet 网络和 YOLOv3 算法的船舶跟踪识别[J]. 计算机应用,2019,39(6): 1663 – 1668.
LIU Bo, WANG Shengzheng, ZHAO Jiansen, et al. Ship tracking recognition based on darknet network and YOLOv3 algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(6): 1663 – 1668.

[9] VISWESVARANi C. Multiple regression in behavioral research: Explanation and prediction [J]. Personnel Psychology, 1998, 51(1): 223 – 226.

[10] 成常杰,陆晓骏. 基于多元线性回归的螺纹钢价格分析[J]. 冶金管理,2023(459): 49 – 53.
CHENG Changjie, LU Xiaojun. Price analysis of rebar based on multiple linear regression [J]. China Steel Focus, 2023(459): 49 – 53.

[11] HYNDMAN R J, KOEHLER A B. Another look at measures of forecast accuracy[J]. International journal of forecasting, 2006, 22(4): 679 – 688.

[12] LEE Z J, LUO X X. Predicting rainfall-induced landslide using bee colony algorithm based on support vector regression [J]. Recent Advances in Computer Science and Communications, 2023, 16(1): 33 – 37.