

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80663

基于动态图像的小麦加工粒径在线检测装置设计

王明旭¹ 赵浩钧¹ 杨磊¹ 吴军永² 吴润泽³

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河北华乐面粉机械集团有限公司, 河北 石家庄 050800;
3. 大连理工大学盘锦校区, 辽宁 盘锦 124000)

摘要: [目的] 解决传统小麦加工磨下物粒径分布离线检测反馈迟滞、检测效率低等问题。[方法] 将动态图像法应用到小麦加工过程的粒径检测中, 基于小麦加工工艺设计一台在线粒径检测装置, 设计装置关键结构与算法软件, 并使用该装置与人工筛分法对样品物料进行对比分析。[结果] 与筛分法和激光法相比, 装置对 I 皮磨与 II 皮磨物料的检测结果最大相对误差分别不超过 3.2%, 14.7% 和 2.3%, 14.2%, I 皮磨物料重复性试验相对误差不超过 2.6%。[结论] 将动态图像法应用到小麦加工行业粒径在线检测具有可行性。

关键词: 小麦; 粒径; 动态图像法; 在线检测; 磨粉

Design of online inspection device for wheat processing grain size based on dynamic image

WANG Mingxu¹ ZHAO Haojun¹ YANG Lei¹ WU Junyong² WU Runze³

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
2. Hebei Pingle Flour Machinery Group, Shijiazhuang, Henan 050800, China; 3. Dalian University of Technology at Panjin, Panjin, Liaoning 124000, China)

Abstract: [Objective] To address the prominent issues of delayed feedback and low detection efficiency in the offline particle size distribution detection of traditional wheat processing. [Methods] The dynamic image method was applied to particle size detection in the wheat processing process. An online particle size detection device was designed based on wheat processing technology, including the design of key structures and algorithm software. The device was compared and analyzed with the manual sieving method for sample materials. [Results] Compared with the sieving method and laser method, the maximum relative errors in the detection results of the device for the I and II skin grinding materials were no more than 3.2%, 14.7%, and 2.3%, 14.2%, respectively. The relative error of the repeatability test for the I skin grinding material did not exceed 2.6%. [Conclusion] The application of the dynamic image method to online particle size detection in the wheat processing industry is feasible.

Keywords: wheat; particle size; dynamic image method; on-line inspection; milling

在小麦制粉加工工艺中, 磨粉机磨下物的粒径分布能够直接反映出磨粉机的工艺参数调节情况。中国小麦加工磨下物粒径检测多依靠人工离线筛分法, 其检测效率较低, 对生产的指导反馈性迟滞, 加工品质难以察觉^[1], 已无法满足日益发展的智能化小麦制粉趋势。

目前, 常用的粒径检测方法包括图像法、激光法、筛

分法、电阻法等^[2]。激光法粒径检测结果受分布模型影响较大, 仪器造价较高且不易移动; 电阻法基于小孔电阻原理, 被检测颗粒应浸没于电阻液中, 常用于颗粒计数系统; 筛分法无法实现在线的粒径检测。图像法分为静态图像法和动态图像法, 与静态图像法相比, 动态图像法的采样量大、无取样误差、能够连续检测、颗粒无黏结重叠

基金项目: 河南省教育厅科学技术重点研究项目基金(编号: 24A460004); 河南省科技研发计划联合基金(编号: 232103810084); 河南省粮油仓储建筑与安全重点实验室开放课题基金(编号: 2021KF-B02)

通信作者: 王明旭(1980—), 男, 河南工业大学教授, 博士。E-mail: wmx20032002@163.com

收稿日期: 2024-05-23 **改回日期:** 2025-02-06

引用格式: 王明旭, 赵浩钧, 杨磊, 等. 基于动态图像的小麦加工粒径在线检测装置设计[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 74-80.

Citation: WANG Mingxu, ZHAO Haojun, YANG Lei, et al. Design of online inspection device for wheat processing grain size based on dynamic image[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 74-80.

现象^[3-4]。国内外有关动态图像粒径检测系统的研究主要集中在矿石、砂石等领域。艾信等^[5]通过引入动态图像法,解决了人工检测石英砂粒度效率低下、随机误差大等问题;隆清明^[6]通过试验测量煤矿样品发现,采用动态图像法检测颗粒粒径的方法可信度和精确度较高;张燕鸣等^[7]将动态图像法引入到玉米破碎粒度研究中;Whiting等^[8]为研究金属粉末粒径分布,将动态图像法与显微镜法相比较得出,前者是比较靠谱且新颖的一种方式。国内外有关小麦加工工艺中的粒径分布研究主要面向粒径检测方法^[9-11],针对小麦加工粒径在线检测装备的开发尚处于起步阶段。

与其他粒径检测方法相比,动态图像法的检测范围广、重复性与重现性好、样品混合检测效率高,更适用于设计小麦加工粒径在线检测装置。研究拟先对装置的关键部件进行设计与选型,其次对传统Canny算法进行算法优化,使其更适用于小麦加工领域,并结合对比试验分析验证装置粒径检测结果的可靠性与稳定性,旨在为实现小麦加工过程磨下物粒径的在线检测提供依据。

1 装置结构与工作原理

基于小麦制粉的加工工艺过程设计的粒径在线检测装置主要由供料部件、视觉系统、集料部件、清扫部件和控制系统组成(见图1)。

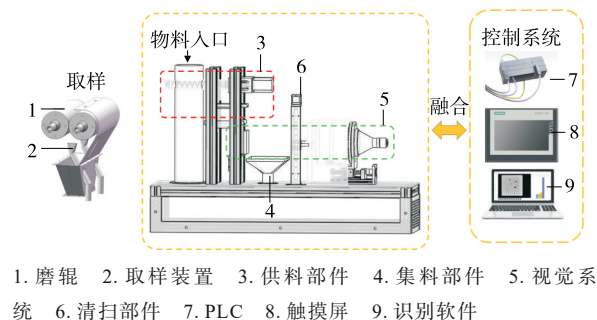


图1 装置结构及工作原理

Figure 1 Device structure and working principle

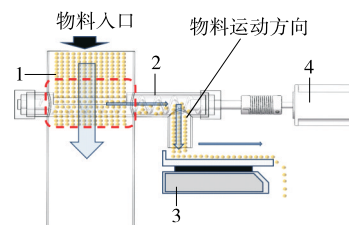
装置工作原理:磨粉机磨辊下方的取样装置对磨下物进行取样,样品输送至入料管中,供料部件的螺旋输料器将物料输送至振动送料器的料道上,样品在料道末端以“单层料瀑”的形式下落;视觉系统拍下背光灯前方的颗粒图像信息并传入计算机;配有相关优化算法的识别软件对图像进行粒径识别并立即统计给出结果;样品物料被回收至集料部件中。实际应用时,粒径分布立即上传至控制中心,实现磨粉机运行参数的实时在线调控。

2 关键部件设计与选型

2.1 供料部件

供料部件(见图2)主要由入料管、螺旋输料器、振动

送料器、步进电机组成,实现装置的物料输送功能。入料管接收由取样装置送来的样品物料,螺旋输料器将物料输送至振动送料器,振动送料器将物料分散并输送至视觉系统。



1. 入料管 2. 螺旋输料器 3. 振动送料器 4. 步进电机

图2 供料部件

Figure 2 Feeding components

螺旋输料器采用无轴螺旋叶片结构,小麦制粉行业应严格控制成本与能耗,且装备的使用寿命要长,而无轴螺旋叶片具备上述特点^[12]。参考文献[13-15]及前期正交试验结果,取无轴螺旋叶片外径24 mm、内径6.5 mm、螺距11 mm、叶片厚度2 mm、叶片与筒壁间隙1 mm。振动送料器输出电压0~260 V,频率范围40~400 Hz,通过控制振动送料器的振幅与频率,实现物料的分散度控制。

2.2 视觉系统

为保证装置作业时粒径识别的效果与精度,设计一套由LED背光灯、工业高速相机、双远心镜头、粒径识别软件组成的视觉系统(见图3)。LED背光灯固定于升降台架上,双远心镜头与工业高速相机固定于可以前后移动,精度为0.1 mm的滚珠丝杠滑台上。在照明方式的选择上,常用的有直接照明、背光照明、散射照明等方式^[16],考虑装置的工作环境需求,选择背光照明的方式。远心镜头的前方设有亚克力透光板,其透光率>95%,清扫部件定期对其进行擦拭,保证拍摄的正常进行且起到对镜头的保护作用。

采用动态图像法拍摄运动颗粒时,相机的曝光时间对检测结果有重要影响^[4],因此需计算相机所需曝光时间。相机在拍摄运动中的图像时会产生拖影,当拖影>1个像素时会对粒度识别准确率造成影响,因此以拍摄图像的拖影≤1个像素为要求进行计算,以I皮磨磨下物为例,将物料简化为粒径为0.72 mm的球形颗粒^[17],按式(1)计算曝光时间。

$$t \leq \frac{x}{d_{pi,x} \sqrt{2Hg}}, \quad (1)$$

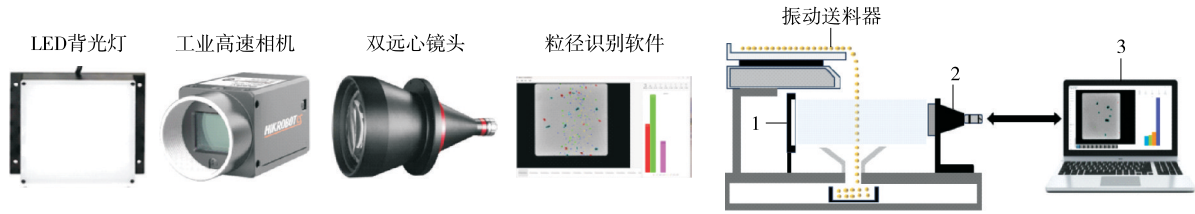
式中:

t ——曝光时间, μs ;

x ——短边视野范围, mm;

$d_{pi,x}$ ——短边像素值, 像素;

H ——物料出料口到LED背光灯中心距离, mm;



1. LED 背光板 2. 工业高速相机与双远心镜头 3. 粒径识别软件

图 3 视觉系统

Figure 3 Visual system

g ——重力加速度, 9.81 m/s^2 。

物料出料口到 LED 背光灯最下方边缘距离 H 为 139 mm , 短边视野范围 x 为 65.3 mm , 短边像素值 $d_{\text{pi},x}$ 为 2048 像素, 根据拍摄图像的拖影 ≤ 1 个像素的需求, 将相关参数代入式(1)可得曝光时间 t 应 $\leq 19.3 \mu\text{s}$ 。

经计算, 高速工业相机选用海康威视 MV-CU060 型 CMOS 相机; 双远心镜头选择视清科技 DTCM118 型高精度双远心镜头; LED 背光灯选择华谷动力 WP-FLC 型发光面板。相机关键参数: 像元尺寸 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, 分辨率 3027×2048 , 曝光时间 $8 \mu\text{s} \sim 1 \text{ s}$; 镜头关键参数: 视野范围 $99.1 \text{ mm} \times 65.3 \text{ mm}$, 倍率 0.075 , 光学畸变 $< 0.1\%$ 。

2.3 图像处理算法

磨下物物料的图像处理算法主要用于从高速抓拍的磨下物图像中提取每颗有效的磨下物颗粒图像, 获取其颗粒轮廓边缘, 并进行颗粒粒径大小分析。磨下物颗粒图像处理主要包括: ① 利用漫水填充方法去除拍摄图像中边缘的不完整颗粒^[18]; ② 优化 Canny 算子, 采用自适应中值—高斯结合滤波与自适应阈值选择算法, 精准识别每个颗粒的轮廓边缘; ③ 利用八方向 Sobel 算子颗粒图像轮廓提取算法, 提取每个颗粒的轮廓边缘^[19]。

Canny 算法优化流程:

(1) 自适应中值—高斯结合滤波器。为防止 Canny 边缘检测时, 噪声像素被判断为虚假边缘, 使用改进的自适应中值—高斯滤波结合的方法。

步骤 1: 设定像素点 (i, j) 的灰度值为 $f(i, j)$, $W(i, j)$ 为目前灰度窗口的大小, 设定 $W(i, j)$ 的最小值为 3, 最大值为 W_{max} , 窗口中灰度值的极大值、中值、极小值分别设为 $f_{\text{max}}, f_{\text{med}}, f_{\text{min}}$ 。

步骤 2: 若判定图像中当前像素点不是噪声, 即满足 $f_{\text{min}} < f(i, j) < f_{\text{max}}$, 则输出 $f(i, j)$; 若判定当前像素点是噪声, 则判断窗口灰度中值是否满足 $f_{\text{max}} > f_{\text{med}} > f_{\text{min}}$, 若满足, 则输出 f_{med} , 不满足则进行下一步。

步骤 3: 若当前窗口灰度值中值为噪声, 不满足 $f_{\text{max}} > f_{\text{med}} > f_{\text{min}}$, 则进行 $W(i, j) = W(i, j) + 1$ (扩大窗口), 如果满足 $W(i, j) < W_{\text{max}}$, 则进行步骤 2, 否则进行步骤 4。

步骤 4: 去除窗口内的所有极值点, 其余像素值依据其与中心的距离做加权平均, 按式(2)计算加权平均。

$$f_{\text{ag}} = \frac{f_1 n_1 + f_2 n_2 + \dots + f_k n_k}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (2)$$

式中:

f_i ——剩余像素;

n_i ——像素权重(越靠近中心越大);

f_{ag} ——输出值。

步骤 5: 图像经过中值滤波后进行自适应高斯滤波处理, 首先采用二维高斯滤波函数产生高斯核:

$$f(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i-r-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

式中:

r ——高斯核半径, 像素;

σ ——标准差。

当卷积窗口产生滑动时, 依据方差大小求出高斯核的标准差 σ 。则按式(4)和式(5)计算图像中某区域内方差。

$$D(i, j) = \frac{\sum_{i, j \in S_{x, y}} (x_{ij} - \bar{x})^2}{i \times j}, \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i, j \in S_{x, y}} x_{ij}}{i \times j}, \quad (5)$$

式中:

$S_{i, j}$ ——点 (i, j) 的卷积窗口;

$D(i, j)$ ——方差。

方差越大, 则在 $S_{i, j}$ 区域内像素值的离散度越高, 选择更小的 σ 所产生的高斯核的系数权重就越大, 对该区域内影响越小, 依据此特性, 将 $D(i, j)$ 与二维高斯波函数 $f(i, j)$ 作比, 得:

$$R(i, j) = \frac{D(i, j)}{f(i, j)}, \quad (6)$$

$$R \approx D\sigma^2 e^{\frac{k}{\sigma^2}}, \quad (7)$$

式中:

$D(i, j)$ ——常量;

$R(i, j)$ ——有关 r 与 σ 的函数。

当 $R=1$ 时, $f(i, j)$ 中参数的权重与像素值权重几乎相等, 此刻该处的 σ 由 $S_{(x, y)}$ 内的像素值的方差 D 求出, 以此反复迭代, 完成对图像中的高斯滤波处理。

将改进的自适应中值滤波与自适应高斯滤波相结

合,保留了中值滤波保护图像边缘的优点,更好地消除了噪声,与自适应高斯滤波结合可以更好地消除图像中的随机误差^[18-19],更适用于小麦制粉的实际工况。

(2) 自适应双阈值选择。滤除图像中噪声后,通过提取图像中的双阈值并连接边缘即可实现边缘检测,由于传统的Canny算法在阈值参数的选择上自适应能力较弱,合理的阈值选择能够提高Canny算子边缘检测效率,为提高其阈值选择效果,通过凹陷研究对Canny算子进行改进,对图像的梯度幅值直方图进行分析,使算法根据图像特征自适应选择双阈值。

步骤1:在颗粒图像的直方图中,计算256级梯度幅值,并保留直方图 $h(i)$ 中非零起始点 $(i_{\text{start}}, h(i_{\text{start}}))$ 和非零终点 $(i_{\text{end}}, h(i_{\text{end}}))$ 。

步骤2:按式(8)计算从起始点 i_{start} 到终点 i_{end} 的幅值斜率。

$$s(i) = \frac{h(i) - h(i_{\text{start}})}{i - i_{\text{start}}}, i_{\text{start}} < i < i_{\text{end}}, \quad (8)$$

式中:

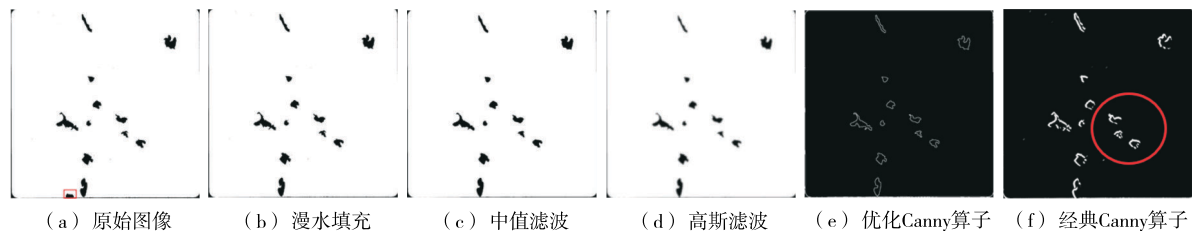


图4 优化边缘检测效果

Figure 4 Optimization of edge detection performance

2.4 粒径识别软件

采用跨平台的C++开发库QT^[20]融合配套算法编写粒径识别软件,软件界面结构合理,工具栏、配置栏层次分明,简单易懂。软件中能够设定 N 种不同的粒径范围,检测时,属于不同粒径范围的颗粒在结果显示中会用不同的颜色矩形标记,并给出粒度分布柱状图,同时软件支持图像与检测结果导出。实际应用时, N 的数量应与不同工厂的筛分标准相匹配。

软件支持设置检测标准,包括取图时每组图像张数、一组中两张图像时间间隔、每组图像的时间间隔。实际应用时,对大批量样品检测时,取图张数与间隔由工厂的工艺所定,调节取图参数,以保证检验结果对生产指导的实时性。

2.5 装置控制系统

小麦制粉粒径在线检测装置的控制系统(图5)由PLC实现装置的运行控制;利用触摸屏实现装置运行参数的监测;使用继电器控制LED背光灯、振动送料器的启闭;利用电机驱动器控制供料、清扫滑台、相机滑台的电机旋转;利用以太网实现控制系统与视觉系统的在线通

$s(i)$ 、 i ——斜率和梯度幅值。

步骤3:寻求斜率 $s(i)$ 的最大值和对应的幅值 i_{peak} ,则梯度直方图的凸点为 $(i_{\text{peak}}, h(i_{\text{peak}}))$ 。若 $i_{\text{peak}} < i_{\text{end}}$,且 $i_{\text{start}} = i_{\text{peak}}$,则返回步骤2,否则进行步骤4。

步骤4:通过以上步骤,得到直方图中共有 N 个凸点 $(i_{p1}, h(i_{p1})), (i_{p2}, h(i_{p2})), \dots, (i_{pn}, h(i_{pn}))$,用直线将这 N 个凸点与非零起点和非零终点连接起来,得到包络直方图 $h(i)$ 的最小凸点多边形。

步骤5:计算直方图的凹陷值 $c(i)$,其中, $c(i) = \bar{h}(i) - h(i)$ 。如果梯度幅值的高阈值为 T_h ,低阈值 $T_l = 0.4T_h$,则基于凹陷值的最大值来选择阈值。通过以上步骤,利用凹陷研究方法改进Canny算子,分析图像中梯度幅度直方图,并根据图像特征完成自适应双阈值选择。

由图4可知,经典Canny算子明显存在边缘信息丢失和边界信息模糊不清现象(红圈标注),试验改进的Canny算子在保证边缘信息完整的情况下,有效剔除了噪声等杂质信息对边缘检测效果的干扰,增强了边缘检测及粒度分布检测结果的准确性。

信。实际应用时,一台PLC控制系统可控制多台粒径检测装备。

3 样机性能试验

3.1 对比试验

为验证小麦加工粒径在线检测装置的精确性与稳定性,通过对比试验设计装置与筛分法、激光法的检测结果,分析装置的检测性能。试验物料为实验室磨粉机平台磨出符合生产标准的I皮磨与II皮磨的磨下物物料;筛分法选用上海嘉定粮油仪器有限公司生产的JJSY30×10型筛分仪;激光法选用山东耐克特生产的NKT2020-L激光粒度分析仪;试验设计装置选用最小外接矩形宽度^[21]作为粒度计算标准,其更接近于实际应用的筛分法粒径值。

试验方法:①两种物料均采用五点取样法分别取3次样品各150g,采用筛分法及激光法检测样品粒径分布并记录每次所用时间;②两种物料均采用试验设计的粒径检测装置,通过控制转速与振动送料器频率,取150g样品进行3次粒径检测,取图张数为20张,取图间隔为0.1s。筛分法中筛号规格分布:CB50筛下物、CB50筛上

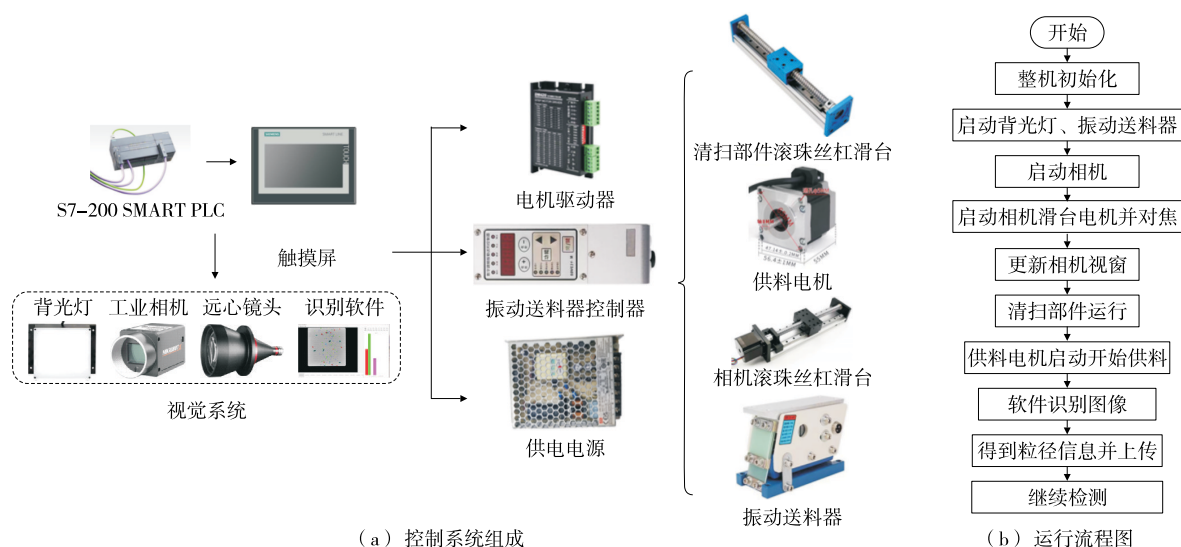


图 5 控制系统

Figure 5 Control system

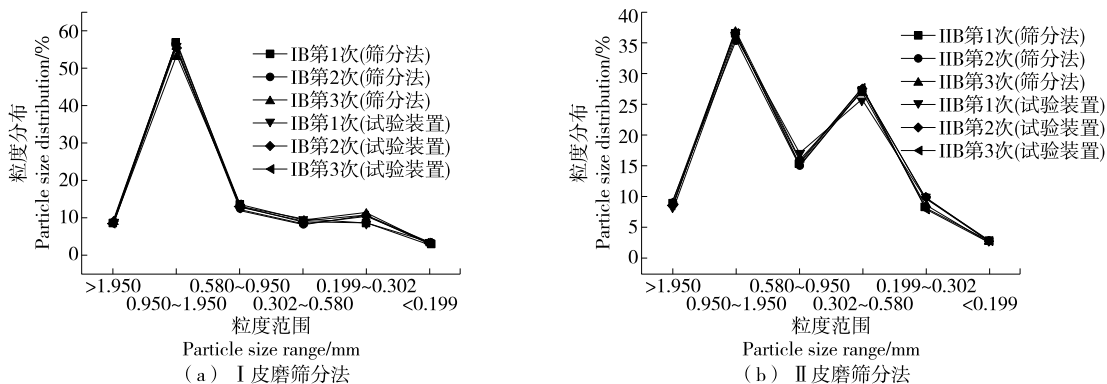


图 6 筛分法与试验装置的检测结果对比

Figure 6 Comparison of screening method with the detecting results of the device in this paper

物、CQ22 筛上物、64Z 筛上物、20Z 筛上物,对应的激光及装置设置的粒径范围规格分别为 <0.199 , $0.199\sim0.302$, $0.302\sim0.580$, $0.580\sim0.950$, $0.950\sim1.950$, >1.950 mm。筛分法与试验装置的检测结果对比如图 6 所示,激光法与试

验装置的检测结果对比如图 7 所示。

3.2 重复性试验

采用试验设计的粒检测装置通过控制转速与振动送料器频率,取 150 g I B 物料样品采用试验装置检测完

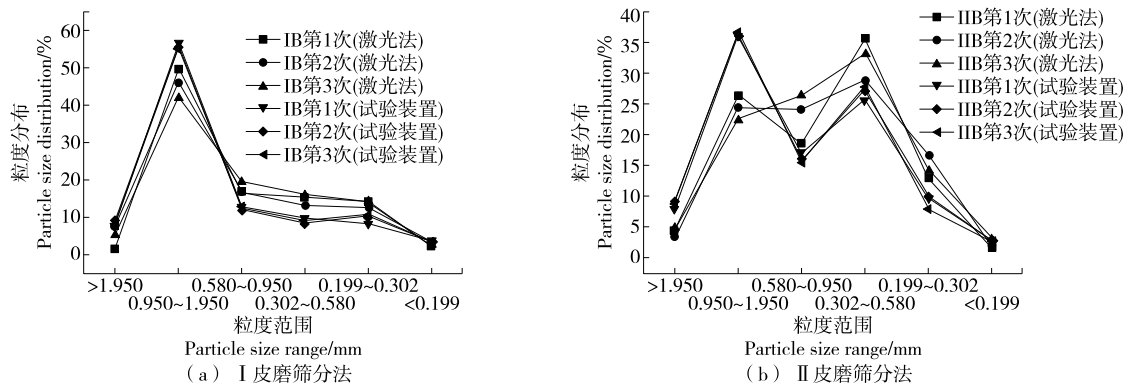


图 7 激光法与试验装置的检测结果对比

Figure 7 Comparison of laser method with the detection results of the device in this paper

后,在收集箱内回收物料,再次采用装置检测,共检测5次并分析试验数据。重复性试验结果见表1。

表1 重复性试验结果

Table 1 Repeatability test results

粒度范围/mm	筛上物累计/%				
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
>1.950	8.6	9.2	7.8	8.0	9.1
0.950~1.950	55.1	53.2	54.1	53.7	55.3
0.580~0.950	14.2	13.3	14.1	15.2	12.6
0.302~0.580	8.4	9.2	9.6	8.7	7.9
0.119~0.302	10.5	11.8	10.9	12.1	11.6
<0.199	3.2	3.3	3.5	2.3	3.5

3.3 试验结果

由图6~图7可知,对比筛分法与试验装置,对于Ⅰ皮磨磨下物物料,试验方法的检测结果与筛分法的最大相对误差为3.2%;对于Ⅱ皮磨磨下物物料,试验方法的检测结果与筛分法的最大相对误差为2.3%,两种方法的检测结果基本一致,拟对性^[22]较高,但略有差别。出现误差的原因有:①从检测方法来说,筛分法中部分颗粒会从筛孔的对角线方向落下,被判定为小级别颗粒,而动态图像法的依据为颗粒最小外接矩形的短边,且其测量结果取决于颗粒对准镜头时的方向;②在测量原理上,筛分法的分级标准以质量为依据,动态图像法则以像素占比分级,本身就存在一定误差;③在检测手段上,筛分法在仪器晃动过程中,可能导致部分大颗粒被破碎而变为小颗粒。对比激光法与试验装置,对于Ⅰ皮磨磨下物物料,试验方法的检测结果与激光法的最大相对误差为14.7%;对于Ⅱ皮磨磨下物物料,试验方法的检测结果与激光法的最大相对误差为14.2%,两者的检测结果误差较大,拟对性较差,激光法的检测稳定性不足,波动性较大,且在Ⅱ皮磨中表现更为突出,激光法本身最大误差为7.9%。出现该现象的原因有:激光法基于激光与样品颗粒的相互作用,采用米氏散射理论^[23],依据颗粒样品表面激光的散射强度来判定颗粒粒径,并将颗粒假定为球形颗粒,由于磨下物颗粒的光折射率与吸光率差别较大,因此每次测得的结果波动性较大,且激光法测得的颗粒粒径相当于相同衍射角的球体的直径^[24],对于不规则的颗粒来讲,截面积的波动性较大,造成了激光法与动态图像法相比的误差较大且稳定性不足。传统的粒度检测手段为离线筛分法,而试验装置的检测结果与筛分法的拟对性较好,证明了试验装置的实用性,可以替代现有的方式实现在线自动化检测。

由表1可知,5次检测结果的粒径分布基本一致,存在一定的误差,最大相对误差为2.6%,在允许范围内,表明试验装置的稳定性较好。重复性较好的原因在于相机较

高的帧率与较好的分辨率,基本做到所有类型颗粒无漏拍且图像较为清晰。

3.4 应用潜力分析

记录3种方式下的检测时间,发现筛分法平均需要5~7 min,激光法平均需要3~4 min,而试验装置仅需8~10 s。通过耗时对比可以发现,动态图像检测法更有优势,应用于实际小麦制粉加工时,能够提升制粉效率。

常规人工筛分法需要经历人工取样→样品称重→筛网布置与检查→打开筛分机器→取出每层样品并称重→分析计算粒径分布数据→根据粒径分布数据调控加工参数。采用试验装置可以直接从制粉流程中自动取料,无需人工干预,可以立即得到粒径分布信息,实现磨粉机的实时在线自动化调整,而人工筛分需要较长时间,提高了检测结果对生产的实时指导意义,在应用时,实现了磨下物粒径的在线连续检测。

在经济效益方面,实际应用中,小麦加工粒径在线检测装置能够有效推动节能降耗,小麦制粉工艺应严格控制成本,磨粉是其中耗电最多的一环。磨粉机的自动化调整,减小了因扎距调节或喂料速度不合适等情况带来的额外电力消耗。同时经设计优化,也能将装置应用于稻谷、玉米等原粮加工工艺中。

4 结论

基于动态图像法设计了一种小麦加工粒径在线检测装置。该装置能够实时在线检测磨下物粒径分布情况,解决了传统筛分法对生产指导较为滞后、不能实现在线实时检测的突出问题。传统筛分法相比,试验装置对于Ⅰ皮磨与Ⅱ皮磨物料的检测结果最大误差分别为3.2%、2.3%,拟对性较好。与激光法相比,试验装置对于Ⅰ皮磨与Ⅱ皮磨物料的检测结果最大相对误差分别为14.7%和14.2%,拟对性较差。重复性试验最大误差为2.6%,表明试验装置能够替代传统的筛分法进行在线粒度检测。该装置的供料方式上为螺旋输送机供料,未来可以考虑采用其他供料方式,如利用高速气流进行供料,同时为了提高识别精度,可以考虑采用多方位镜头识别技术,利用3~4台相机进行多角度拍摄识别,提高粒径检测准确率,这也是未来的研究关键点和研究方向。

参考文献

- [1] 温锁让, 杨磊. 浅谈在线粒度检测在面粉生产过程中的应用[J]. 粮食加工, 2013, 38(4): 17-19.
- WEN S R, YANG L. Application of on-line particle size detection in flour production process[J]. Grain Processing, 2013, 38(4): 17-19.
- [2] 郭观凯. 干法动态图像粒度粒形分析系统研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020: 4-11.
- GUO G K. Study on granularity and shape analysis system of dynamic image based on dry method[D]. Zibo: Shandong

- University of Technology, 2020: 4-11.
- [3] ULUSOY U, IGATHINATHANE C. Particle size distribution modeling of milled coals by dynamic image analysis and mechanical sieving[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 143: 100-109.
- [4] ROOSTAEI M, HOSSEINI S A, SOROUSH M, et al. Comparison of various particle-size distribution-measurement methods[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2020, 23 (4): 1 159-1 179.
- [5] 艾信, 刘广胜, 陆梅, 等. 动态图像法检测压裂石英砂支撑剂粒度粒形[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(3): 332-339.
- AI X, LIU G S, LU M, et al. Dynamic image method for detecting the particle size and shape of fracturing quartz sand proppant[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(3): 332-339.
- [6] 隆清明. 动态图像法测量煤样粒度粒形研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(1): 6-9.
- LONG Q M. Study on particle size of coal sample measured by dynamic image method[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1): 6-9.
- [7] 张燕鸣, 白林, 杨秀娟, 等. 动态图像颗粒分析法在玉米粒度及粒度分布测定中的应用[J]. 饲料研究, 2016(1): 46-51.
- ZHANG Y M, BAI L, YANG X J, et al. Application of dynamic image particle analysis method in determination of corn particle size and particle size distribution[J]. Feed Research, 2016, 39 (1): 46-51.
- [8] WHITING J G, TONDARE V N, SCOTT J H J, et al. Uncertainty of particle size measurements using dynamic image analysis[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 531-534.
- [9] TIAN X L, WANG X X, WANG Z, et al. Particle size distribution control during wheat milling: nutritional quality and functional basis of flour products: a comprehensive review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57 (12): 7 556-7 572.
- [10] 顾尧臣. 主食面制品加工技术的探讨和建议(二)[J]. 粮食与食品工业, 2003(4): 7-14.
- GU Y C. Discussion and suggestion of staple pastry processing technique[J]. Cereal and Food Industry, 2003, 10(4): 7-14.
- [11] STEVENS D J. Measurement of the sub-sieve particle size distribution of flour[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1963, 14(6): 405-411.
- [12] WANG M, XU Q, JIANG E, et al. Design and pilot test for feeder of biomass shaftless screw continuous pyrolysis device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 83-88.
- [13] 季雨. 基于 CFD-DEM 螺旋输送机内颗粒流动特性数值模拟研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020: 20-36.
- JI Y. Numerical simulation of flow behavior of particles in a screw conveyor based on CFD-DEM[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020: 20-36.
- [14] 刘威, 唐倩, 刘宗敏, 等. 水平式螺旋输送机运动模型搭建和参数化设计[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 96-99.
- LIU W, TANG Q, LIU Z M, et al. The movement model construction and parametric design of horizontal screw conveyor[J]. Food & Machinery, 2019, 35(6): 96-99.
- [15] WANG M X, ZHAO H J, LI S Q, et al. Design and research on feeding components of wheat flour particle size detection device[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2024, 73(2): 40-49.
- [16] 杨林. 动态图像颗粒粒度粒形测量系统研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2017: 14-16.
- YANG L. Research on dynamic image particle size and shape measurement system[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017: 14-16.
- [17] 黄奇鹏, 武文斌, 李聪, 等. 磨粉机磨辊齿型参数与功耗关系研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(1): 30-33.
- HUANG Q P, WU W B, LI C, et al. Research on the relationship between tooth profile parameters and power consumption of roller mill[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(1): 30-33.
- [18] 毛晓, 李林升, 王庆秋, 等. 基于漫水填充与环形校正结合的极耳缺陷检测[J]. 电源技术, 2022, 46(9): 1 000-1 004.
- MAO X, LI L S, WANG Q Q, et al. Defect detection of tab ear based on the combination of flood filling and ring correction [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(9): 1 000-1 004.
- [19] LIU W J, WANG L. Quantum image edge detection based on eight-direction Sobel operator for NEQR[J]. Quantum Information Processing, 2022, 21(5): 190.
- [20] 范智霖, 佃松宜. 基于 Qt 的遥操作 GIS 维护机器人监控系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(1): 1-6, 81.
- FAN Z L, TIAN S Y. Design and implementation of Qt-based remote operation GIS maintenance robot monitoring system [J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(1): 1-6, 81.
- [21] LIU Y Q, DU X, SHEN H L, et al. Estimating generalized Gaussian blur kernels for out-of-focus image deblurring[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(3): 829-843.
- [22] 蔡斌, 王瑞青, 叶上游. 动态图像法、激光散射法及筛分法的比较[J]. 炭素, 2018(1): 27-34.
- CAI B, WANG R Q, YE S Y. Comparison of dynamic image analysis, laser diffraction and sieve analysis[J]. Carbon, 2018 (1): 27-34.
- [23] 王克强, 李德文, 王有鹏. 基于图像法和激光法的山东半岛黄岛海滩沉积物粒度特征对比[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 229-237.
- WANG K Q, LI D W, WANG Y P. Comparisons of grain-size analysis results of beach sediments in the Huangdao district, Qingdao, based on imaging and laser methods[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 229-237.
- [24] 丁莉. 基于激光前向散射法的颗粒物浓度检测装置设计[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023: 11-22.
- DING L. Design of particle concentration detection device based on laser forward scattering method[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023: 11-22.