

基于机器视觉的牡蛎分级设备设计

Research on oyster grading equipment based on machine vision

赵澜锴 高国栋 孙子皓 李响 吴云泽

ZHAO Lankai GAO Guodong SUN Zihao LI Xiang WU Yunze

(大连海洋大学航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023)

(College of Navigation and Shipbuilding Engineering, Dalian Ocean

University, Dalian, Liaoning 116023, China)

摘要:目的:提高牡蛎分级的精确性和全面性。方法:提出并设计了牡蛎自动化分级设备,确定了旋转滚筒与挡板传送带结合的牡蛎排队结构、质量检测 and 机器视觉检测相结合的分级方式,完成了牡蛎分级设备的整体结构设计。通过工业相机采集牡蛎图像,使用大津法二值化、高斯滤波处理、Canny 算子边缘提取等方法提取牡蛎图像,通过机器视觉算法以长度和饱满度为标准对牡蛎进行分级,并进行机器视觉分级与人工分级对比试验。结果:该设备分级准确率为 95.4%,图像检测速度约为 0.647 s/幅。结论:机器视觉对牡蛎分级是有效的,可以较为准确地对牡蛎进行分级。

关键词:牡蛎;自动化分级;机器视觉;图像滤波;饱满度检测

Abstract: **Objective:** To improve the accuracy and comprehensiveness of oyster grading. **Methods:** The oyster automatic grading equipment was proposed and designed, the oyster queuing structure combining the rotating drum and the baffle conveyor belt, the grading method combining weight detection and machine vision detection were determined, and the overall structure design of the oyster grading equipment was completed. The oyster image was collected by industrial camera, and the oyster image was extracted by Otsu binarization, Gaussian filtering processing, Canny operator edge extraction and other methods. The oyster was graded by machine vision algorithm with length and fullness as the standard, and the comparison test between machine vision grading and manual grading were carried out. **Results:** The machine vision classification accuracy of oysters was 95.4%, and the image

detection speed was about 0.647 s/image. **Conclusion:** Machine vision is effective for oyster grading and can classify oysters more accurately.

Keywords: oyster; autonomous classification; machine vision; image filtering; plumpness detection

近年来,中国牡蛎产量大幅上升,年产量 500 余万 t, 占全球产量 80% 以上^[1]。分级是牡蛎进一步加工的关键。现阶段中国牡蛎加工机械发展还不够成熟,牡蛎分级基本由人工或质量分级机完成,分级指标不够完善需要消耗大量人力物力。

目前,机器视觉已被广泛应用于各类物品识别分级中,因其非接触、检测稳定的优点,在农产品分级领域取得了很好的效果^[2]。林艾光等^[3]设计并开发了通过机器视觉检测扇贝大小的扇贝分级方法。郭常有等^[4]提出利用图像处理技术,采用可靠的阈值分割算法确定出最佳阈值,并通过改进的 OPTA 算法确定目标图像的边界,利用目标图像长度作为条件判断扇贝的大小。包振民等^[5]提出使用机器视觉对贝类进行表皮分析,以此来测量贝类的尺寸和质量,但需要人为控制上料且难以进行较大数目的测量。李红^[6]将机器视觉与称重结合设计了按照质量和图像面积进行海参自动分级的设备。曹先庆等^[7]提出一种基于饱满度对牡蛎分级的机器视觉算法,验证了通过外部形态对牡蛎进行分级的可行性。还有学者^[8-9]提出通过牡蛎的外形对香蕉形、优质和不规则形状牡蛎进行检测分类,以此来筛选出优质牡蛎。但是牡蛎的形状不止 3 种,而且外形不规则是牡蛎的生物特征,以此作为标准分级界限不够明确。

目前用于牡蛎分级的质量分级机无法考虑到牡蛎的尺寸、形状、饱满程度等因素,振动筛板、滚筒筛、分级辊等常规分级设备对牡蛎的分级准确率较低。为了提高牡蛎分级的精确性和全面性,研究拟基于机器视觉和图像处理技术对牡蛎进行分级,并通过试验对其可行性进行验证。

基金项目:辽宁省教育厅科研项目(编号:JYTMS20230495);辽宁省教育厅科学研究项目(编号:LJKZ0723)

作者简介:赵澜锴,男,大连海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:高国栋(1979—),男,大连海洋大学副教授,硕士生导师,硕士。E-mail:2857723648@qq.com

收稿日期:2023-07-06 **改回日期:**2023-12-25

1 牡蛎分级设备结构设计

1.1 整体结构设计

牡蛎分级设备整体结构由自动上料系统和检测分级系统组成,在工作时,牡蛎先通过两级传送带进行分批自动上料。第二级传送带将挡板改变为疏水齿,并在传送带上设有疏水孔,可以有效减少水分对后续检测的影响。牡蛎由第二级传送带运输至上料板后进入定速旋转圆筒和挡板传送带相结合的牡蛎排队结构,经过排队处理后逐个被运送至质量检测系统。经质量检测后符合标准的牡蛎被传送带运输通过机器视觉检测系统,由工业相机采集牡蛎图像后传输至计算机进行图像处理和检测分级,分级后计算机驱动挡杆将牡蛎推入对应等级的储存筐中。设备整体结构如图 1 所示。

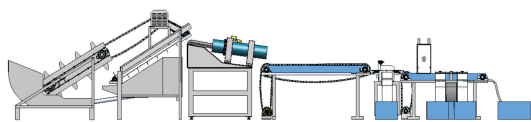


图 1 总体结构示意图

Figure 1 Overall structure diagram

1.2 排队结构设计

为了保证质量检测和机器视觉检测分级的准确性,需要将待分级的牡蛎进行排队处理,使牡蛎能够逐个进入分级系统进行检测。为了满足这一要求,可以设计出由上料板、圆筒、皮带、电机、挡板传送带等组成的牡蛎排队结构,如图 2 所示。当设备运行时,牡蛎从上料板进入与水平线呈倾斜状态的定速旋转圆筒,随着空心圆筒的转动,牡蛎在重力和摩擦力作用下成列从圆筒末端滑出,逐个落入传送带后被运输至分级系统。圆筒定速旋转可以避免牡蛎在上料板形成堆积和堵塞,保证牡蛎上料过程的流畅进行,进而确保整个设备的稳定性。

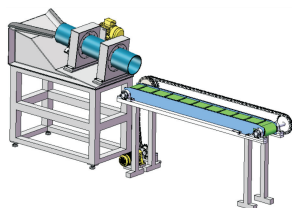


图 2 排队结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of queuing structure

为了验证整套结构的稳定性,使用 Ansys Workbench 软件做相关模态分析。首先对排队结构进行简化,对零件各部分赋予材料属性,其中支撑部分为不锈钢结构,支架为铸铁结构,将电机设置为刚体。然后添加边界条件,上料板和旋转圆筒中承载牡蛎的质量均设定为 1 500 g,转换为重力,对排队结构划分网格后选取 15 阶模态。根据模态分析结果,一阶模态为 63.212 Hz,电机固有频率

选取 50 Hz,不会与电机形成共振,固有频率满足要求,因此可以认为排队结构的稳定性满足要求。排队结构的一阶模态如图 3 所示。

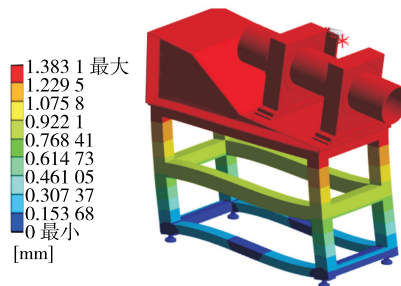


图 3 排队结构一阶模态图

Figure 3 Schematic diagram of queuing structure

1.3 分级系统设计

1.3.1 质量检测系统设计 在机器视觉分级前应采用质量检测的方式判断牡蛎的质量是否对应其等级标准。当牡蛎质量不达标时,计算机接收信号后驱动挡板将不达标的牡蛎筛出,通过质量检测的牡蛎则继续被传送带运输至机器视觉检测系统进行下一步检测。质量检测系统使用的检测方法为电子称重检测,电子称重检测不仅结构简单、易于操作,还可以按需对质量分级的标准进行调整,具有精准高效、数据采集和分析方便、自动化程度高、工作稳定等优点。

1.3.2 机器视觉检测系统设计 机器视觉检测系统主要由传感器、暗箱、光源、工业相机和计算机等组成。牡蛎的颜色一般由青、黄、黑等组成,为了提高图像的质量和对比度,分级系统传送带选择白色哑光材质,确保能够采集到清晰的图像。暗箱内使用环形 LED 光源在牡蛎正上方提供照明环境,选取型号为海康 MV-CA060-11GM 的千兆以太网工业面阵相机搭配焦距 16 mm 的镜头作为图像采集工具,设定相机到传送带的距离为 450 mm。图 4 为图像采集平台示意图。

当牡蛎通过传感器时计算机根据传送带速度在对应时间自动采集牡蛎图像并运行算法对图像进行处理和分级,经过分级后的牡蛎被电动推杆推入对应的储料框中。分级系统结构如图 5 所示。

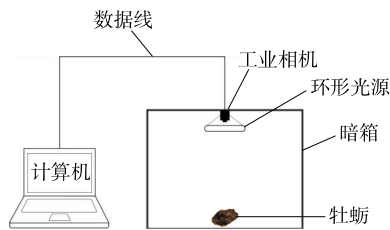
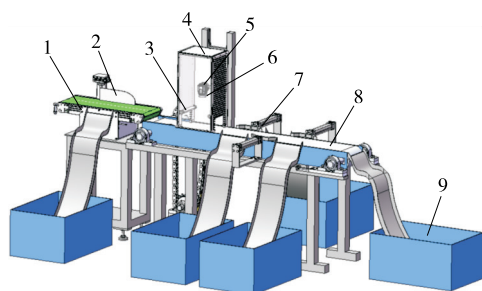


图 4 图像采集平台示意图

Figure 4 Image acquisition platform schematic diagram



1. 质量传感器 2. 挡板 3. 传感器 4. 暗箱 5. 工业相机
6. 光源 7. 电动推杆 8. 传送带 9. 储料框

图 5 分级系统示意图

Figure 5 Schematic diagram of the grading system

2 牡蛎图像处理与分析

2.1 二值化处理

2.1.1 类间方差计算 基于阈值的分割技术被广泛用于各种机器视觉图像检测领域中,全局阈值分割法是一种众所周知的分割方法,其中的大津法具有根据图像的整体特征自适应地确定阈值的特点。通过二值化处理可以提高图像的对比度,使牡蛎图像与背景区分开。大津法考虑图像由两类像素组成,通过计算最优阈值将两类像素分开,使类内方差最小^[10]。根据阈值 T ,可以将牡蛎图像中按照灰度分为两类, $>T$ 的记为 g_1 , $\leq T$ 的记为 g_2 ,两类间的方差 σ 计算如式(1)。

$$\sigma(T) = \omega_1(T)\omega_2(T)[\mu_1(T) - \mu_2(T)]^2, \quad (1)$$

式中:

$\omega_1(T)$ ——图像中灰度 $>T$ 的像素数占总像素数比例;

$\omega_2(T)$ ——图像中灰度 $\leq T$ 的像素数占总像素数比例;

$\mu_1(T)$ ——图像中灰度 $>T$ 的灰度平均值;

$\mu_2(T)$ ——图像中灰度 $\leq T$ 的灰度平均值。

遍历阈值 T ,使 $\sigma(T)$ 达到最大值时的阈值 T 为大津二值化的最佳阈值。

2.1.2 类内元素含量动态占比统计 式(1)中 $\omega_1(T)$ 、 $\omega_2(T)$ 的计算方法如式(2)。

$$\begin{cases} \omega_1(T) = \frac{W_1}{HW} \\ \omega_2(T) = \frac{W_2}{HW} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

H ——牡蛎图像的高度;

W ——牡蛎图像的宽度;

W_1 ——图像中灰度 $>T$ 的像素数;

W_2 ——图像中灰度 $\leq T$ 的像素数。

2.1.3 类内元素灰度动态均值计算 式(1)中 $\mu_1(T)$ 与 $\mu_2(T)$ 的计算方法如式(3)。

$$\begin{cases} \mu_1(T) = \frac{1}{W_1} \sum_{g(x,y) < T} g(x,y) \\ \mu_2(T) = \frac{1}{W_2} \sum_{g(x,y) > T} g(x,y) \end{cases}, \quad (3)$$

式中:

$g(x,y)$ ——图像在像素坐标 (x,y) 处的灰度值。

牡蛎图像二值化结果如图 6 所示。



图 6 牡蛎图像二值化结果图

Figure 6 Oyster image binarization result map

2.2 牡蛎图像轮廓提取

2.2.1 边缘提取 在对牡蛎进行分级前,要先对相机采集到的牡蛎图像进行边缘检测,从得到的图像中提取合适的特征参数,才能获得准确的牡蛎图像。在提取牡蛎图像过程中,牡蛎周围会有牡蛎壳碎屑、附着的海草等因素对牡蛎的轮廓提取产生影响,所以要对牡蛎进行边缘检测。相比于其他边缘检测算子,Canny 算子在高精度的同时还能保持牡蛎边缘信息的完整性,使用 Canny 算子对大津法二值化后的图像进行边缘提取,得到牡蛎的轮廓图如图 7 所示。由图 7 可知,由于噪声的存在或光照不均匀等原因,牡蛎的轮廓边缘产生断裂,出现无法提取出牡蛎闭合轮廓的情况。

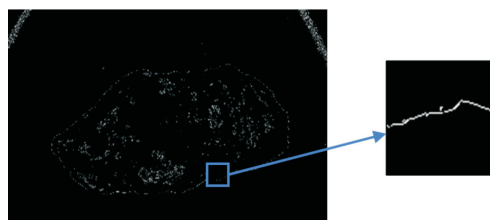


图 7 牡蛎边缘图与边缘断裂示意图

Figure 7 Oyster edge diagram and edge fracture diagram

2.2.2 滤波处理 为了得到闭合的牡蛎轮廓,需要对 Canny 算子提取边缘结果图进行再次滤波处理。高斯滤波在去除图像噪声时可以保留图像的细节,对边缘检测效果良好。经过高斯滤波处理后的牡蛎图像如图 8 所示,断裂的边缘在经过高斯滤波修复后形成闭合轮廓。对高斯滤波后的结果再次进行大津法二值化处理,如图 9 所示,牡蛎的完整轮廓已经被清晰地求出。

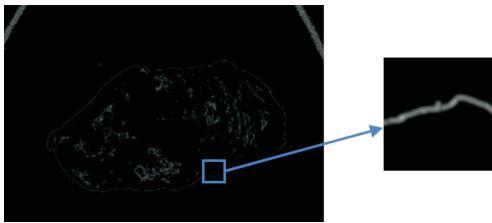


图8 高斯滤波后的牡蛎边缘示意图

Figure 8 Schematic diagram of an oyster edge after Gaussian filtering

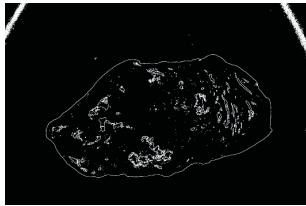


图9 牡蛎再次二值化结果图

Figure 9 Oyster image binarization results again

2.3 牡蛎长度计算

2.3.1 旋转卡壳算法 由于牡蛎边缘凹凸不平的生理特性,可以通过对牡蛎图像进行凸包检测后得到图像轮廓的凸包点集,再提取凸包点集中的最长线段的方法来得到牡蛎的长度。首先使用 Incremental Construction 算法对边缘提取后的牡蛎图像进行凸包检测,得出牡蛎图像轮廓的凸包点集。再通过旋转卡壳算法找到凸包上的一个顶点和与该顶点相邻的一条边作为直径的初始线段,接下来维护两条平行于该直径的直线,并将它们旋转,直到两条直线分别与凸包上的两个点重合,此时直径的长度即为当前计算出的最长直径。之后以这个新的点作为起点,继续执行以上过程直到又回到起点,同时记录下所有出现的最长直径,最后在所有最长直径中选取最大值作为牡蛎图像长度。牡蛎最大长度计算结果如图 10 所示。

2.3.2 实际长度转化 在得出牡蛎图像长度后,需要求出实际长度与像素长度的标定比例来转化出牡蛎的实际长度。通过采集水平放置的长度为 L 的刻度尺图像,测量出图像刻度尺的像素长度 l ,可以求出标定比例 k ,如

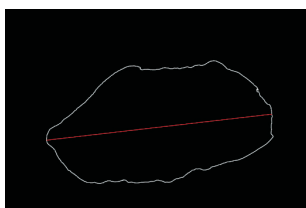


图10 牡蛎最大长度计算结果图

Figure 10 Calculation result graph of maximum length of oyster

式(4)。牡蛎的实际长度为像素长度与标定比例的乘积。

$$k = \frac{L}{l}, \quad (4)$$

式中:

k ——标定比例,mm/像素;

L ——刻度尺实际长度,mm;

l ——刻度尺像素长度,像素。

2.4 牡蛎饱满度计算

在机器视觉分级中,饱满度是对不规则物品分级的有效方式之一^[11],牡蛎外形的饱满度即为自身图像面积与轮廓最小外接矩形的比值。首先提取牡蛎二值图像的全部闭合轮廓,并对轮廓的像素总数当作轮廓的周长进行排序,将长度最大的轮廓作为牡蛎的轮廓,将轮廓内区域记为 G_1 ;拟合出牡蛎轮廓的最小外接矩形,将外接矩形内的区域记为 G_2 ,以此可求出牡蛎饱满度 P ,如式(5)。牡蛎轮廓最小外接矩形如图 11 所示。

$$P = \frac{N_1}{N_2}, \quad (5)$$

式中:

P ——牡蛎饱满度;

N_1 —— G_1 区域内包含像素的总个数;

N_2 —— G_2 区域内包含像素的总个数。

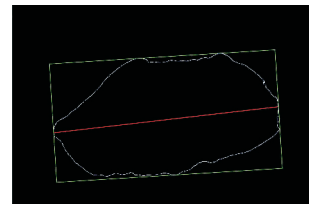


图11 牡蛎轮廓最小外接矩形结果图

Figure 11 Result graph of minimum circumscribed rectangle of oyster contour

3 分级结果与分析

目前牡蛎的分级标准尚无明文规定,通过质量进行分级的方式较为常见,但不同地区的质量分级标准各有差异,无法形成统一的标准。因此可以使用上文提出的分级方法对牡蛎进行试验后将结果与市场调研相结合,设定机器视觉对牡蛎的分级标准:在确定牡蛎质量范围后,同时按照长度和饱满度两个标准进行分级。其中长度为硬性指标,当牡蛎符合长度等级,不满足饱满度标准时,将牡蛎等级降低至下一级。牡蛎品质分级流程如图 12 所示。

经过市场调研和询问相关专家,发现质量 150 g 以上的牡蛎具有较高的具体分级价值。随机选取市场购买的 170 个质量 150 g 以上的牡蛎,通过人工使用游标卡尺测量出长度区间为 100~180 mm,如图 13 所示。使用机器

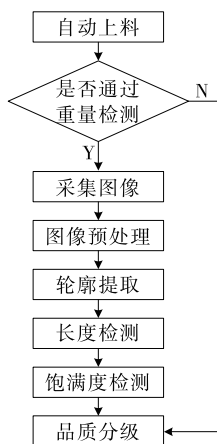


图 12 牡蛎品质分级流程图

Figure 12 Oyster quality grading flow chart

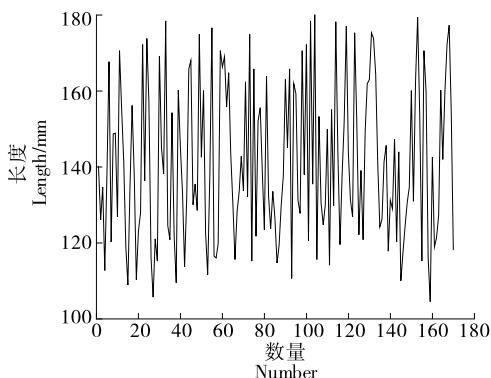


图 13 牡蛎长度区间图

Figure 13 Oyster length interval chart

视觉算法对人工分级后的牡蛎进行饱满度计算,选取饱满度是否 $>70\%$ 作为判断牡蛎外形是否饱满的界限,故设定分级标准如表 1 所示。实际应用时,分级标准可以根据要求进行调整和改进,以适应不同的牡蛎品种和市场需求。

在确定分级标准后,以人工分级和试验分级进行对比试验来验证机器视觉分级的可行性,试验材料为市场购买的 280 个牡蛎。首先人工使用游标卡尺测量牡蛎的外壳长度,并根据外形判断牡蛎的饱满程度将牡蛎分为 4 个等级。采用研究提出的机器视觉方法对牡蛎进行检测分级,结果如表 2 所示。

表 1 牡蛎品质等级分级标准

Table 1 Grading standard of oyster quality

等级	长度/mm	饱满度/%
特级	>16	>70
一级	13~16	>70
二级	10~13	>70
普通	10~13	≤ 70

表 2 牡蛎品质等级分级结果
Table 2 Oyster quality grading results

等级	人工分 级/个	试验分 级/个	分级准确 率/%	总体准确 率/%
特级	50	54	92.6	95.4
一级	98	95	96.9	
二级	92	89	96.7	
普通	40	42	95.2	

其中特级、一级、二级、普通牡蛎的分级准确率分别为 92.6%、96.9%、96.7%、95.2%,总体准确率为 95.4%。因此,影响分级准确率的主要因素是牡蛎壳不对称的生物特性。当牡蛎的平贝壳面朝向相机时,凸贝壳面的凸起使牡蛎在采集图像时呈倾斜状,投影面积大于自身的实际面积,导致机器视觉测量长度结果偏大。这一因素在牡蛎长度达到 150 mm 以上且牡蛎壳凸起较大时带来的影响较为明显,所以有少量一级牡蛎被划分到特级牡蛎。对分级错误的牡蛎再次进行长度测量后得出最大误差为 8 mm,属于合理误差范围;对试验后的总体长度检测结果进行对比,机器视觉对牡蛎图像长度测量与人工测量的平均误差在 5 mm 以内,检测分级的平均速度为 0.647 s/幅,可以满足设定的分级要求。

4 结论

(1) 针对现有牡蛎尺寸检测和分级方法单一的现状,提出并设计了基于机器视觉的牡蛎分级设备。设备由自动上料系统和分级系统组成,通过先质量检测后机器视觉检测的方式对牡蛎进行分级。采用旋转圆筒和挡板传送带结合的排队结构对牡蛎进行排队和输送,使牡蛎能够逐个进行检测分级,实现了分级前牡蛎的自动化上料过程,减少劳动力的投入,节约加工成本,有效提高了牡蛎分级的效率。

(2) 利用高斯滤波和 Canny 算子相结合的图像处理算法对牡蛎图像进行预处理,解决了牡蛎图像中噪声对轮廓提取的影响,准确提取出了牡蛎图像的轮廓。通过凸包检测后采用旋转卡壳算法计算出牡蛎的最大长度,根据牡蛎图像面积与最小外接矩形面积的比值计算出牡蛎外形的饱满度,提出两者相结合的方式对牡蛎进行分级,增加了牡蛎分级的全面性。

(3) 试验结果表明,机器视觉对牡蛎分级是有效的,且与人工分级结果基本一致,平均误差在 5 mm 以下,总体分级准确率为 95.4%,图像检测速度约为 0.647 s/幅。后续将结合深度学习对牡蛎外形进行缺陷检测,以期从外形特征中实现更精准的牡蛎分级。

参考文献

- [1] 中国牡蛎产业发展报告[J]. 中国水产, 2021(6): 20-31.
China oyster industry development report [J]. Chinese Fisheries, 2021(6): 20-31.
- [2] 吴江春, 王虎虎, 徐幸莲. 基于机器视觉的鸡胴体断翅快速检测技术[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 253-261.
WU J C, WANG H H, XU X L. Rapid detection technology for broken-winged broiler carcass based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(22): 253-261.
- [3] 林艾光, 孙宝元, 矢田贞美. 基于机器视觉的虾夷扇贝分级检测方法研究[J]. 水产学报, 2006(3): 397-403.
LIN A G, SUN B Y, YADA S. Studies on the detecting method of scallop grading based on machine vision[J]. Journal of Fisheries of China, 2006(3): 397-403.
- [4] 郭常有, 曹广斌, 韩世成, 等. 基于图像处理技术的扇贝尺寸及位置自动识别[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(6): 578-582.
GUO Y C, CAO G B, HAN S C, et al. Automatic measurement of size and location in scallop based on image processing[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(6): 578-582.
- [5] 包振民, 王心园, 黄晓婷, 等. 一种自动化贝类表型分析系统: CN202110185624.5[P]. 2021-07-23.
BAO Z M, WANG X Y, HANG X T, et al. Automatic shellfish phenotype analysis system: CN202110185624.5[P]. 2021-07-23.
- [6] 李红. 海参等级自动分选系统设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 9.
LI H. Design and implementation of sea cucumber grade automatic selecting system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 9.
- [7] 曹先庆, 王志鹏, 吴富村. 基于机器学习算法的牡蛎肥满度分类[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5 511-5 517.
CAO X Q, WANG Z P, WU F C. Classification of plumpness in crassostrea gigas based on the machine learning[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(17): 5 511-5 517.
- [8] LEE D J, XU X Q, LANE R M, et al. Shape analysis for an automatic oyster grading system[J]. Proc Spie, 2004, 5 606: 27-36.
- [9] XIONG G, LEE D J, MOONK R, et al. Shape similarity measure using turn angle cross-correlation for oyster quality evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 178-186.
- [10] 申铨京, 刘翔, 陈海鹏. 基于多阈值 Otsu 准则的阈值分割快速计算[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 144-149.
SHEN X J, LIU X, CHEN H P. Fast computation of threshold based on multi-threshold Otsu criterion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(1): 144-149.
- [11] 弋伟国. 基于机器视觉的枸杞分级分选机控制系统研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016: 28.
YI W G. Research on the control system of wolfberry sorting machine based on machine vision [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016: 28.
- [9] WANG C X, ZHU X Z. 3D numerical simulation of flow and mixing performances in novel tri-screw and four-screw extruders [C]// 2018 7th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (ICAMCS 2018). [S. l.]: Clausius Scientific Press, 2019: 178-183.
- [10] 赵玉莲, 李鑫, 安琪, 等. 非等温条件下啮合同向双螺杆挤出过程数值模拟分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 76-79.
ZHAO Y L, LI X, AN Q, et al. Numerical simulation analysis of meshing twin-screw extrusion process under non-isothermal conditions[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 76-79.
- [11] ZHANG X M, FENG L F, CHEN W X, et al. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder [J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(9): 1 772-1 783.
- [12] 朱晓旭, 刘福胜, 宋修艳. 聚乳酸材料的化学解聚研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(9): 176-181.
ZHU X X, LIU F S, SONG X Y. Research progress on chemical depolymerization of polylactic acid materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(9): 176-181.
- [13] 彭义波, 张玉清, 张旭浩, 等. 在特定温控系统下 PLA 和 PE-LD 吹膜过程的温度场研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(5): 46-51.
PENG Y B, ZHANG Y Q, ZHANG X H, et al. Study of the temperature field of PLA and PE-LD film blowing process under a specific temperature control system[J]. China Plastics, 2017, 31(5): 46-51.
- [14] 李成, 薛晓俊, 胡建树, 等. 啮合同向双螺杆挤出机结构参数对混合关键参量的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(10): 2 640-2 648.
LI C, XUE X J, HU J S, et al. Effect of structural parameters of meshing twin-screw extruder on key parameters of mixing[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(10): 2 640-2 648.
- [15] 韩海川. 螺杆挤出机螺杆结构对挤出流场影响的数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2020: 80.
HAN H C. Numerical simulation of the influence of screw structure on extrusion flow field of screw extruder[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 80.
- [16] 周彦豪. 聚合物加工流变学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 43-51.
ZHOU Y H. Fundamentals of rheology in polymer processing[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 43-51.
- [17] 于森, 郭树国, 王丽艳. 二阶非对称双螺杆挤出机三维仿真[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 111-114.
YU M, GUO S G, WANG L Y. Three-dimensional simulation of a second-order asymmetric twin-screw extruder [J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 111-114.

(上接第 64 页)