

# 核桃无损检测技术研究进展

国潇雨, 李 玮\*, 王应彪

(西南林业大学机械与交通学院, 昆明 650224)

**摘 要:** 核桃品种多样、食味香纯、口感细腻、出油率高, 能够健脑益智、补气养血、润燥化痰、防癌抗癌, 是我国栽培历史悠久、营养价值丰富的农产品, 有着“万岁子”“长寿果”的美誉。但核桃在生长和处理过程中, 受产地、品种、气候、储存环境、处理设备等因素的影响, 容易造成核桃品质不一, 甚至出现霉烂、虫害和变质等现象, 影响核桃品质和后续深加工。为保证核桃产品质量, 需对核桃进行检测和分级, 而无损检测技术可以在不破坏核桃本身的情况下对其进行高效快速的检测, 避免检测过程中样品成分和营养损失, 因此被广泛应用于核桃检测中。本文总结了3种无损检测技术, 对比分析了3种无损检测技术的优劣, 并从产地品种检测、内部品质检测、外部缺陷检测、异物分类检测4个方面总结了无损检测在核桃相关检测中的应用研究进展, 提出了核桃相关检测中存在的问题, 并对核桃无损检测研究的发展前景进行了展望, 为无损检测技术在核桃相关领域应用提供了参考。

**关键词:** 品种品质检测; 无损检测; 核桃

## Research progress of walnut non-destructive testing technology

GUO Xiao-Yu, LI Wei\*, WANG Ying-Biao

(College of Mechanical Engineering and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**ABSTRACT:** Walnut has a variety of varieties, pure taste, delicate taste, high oil yield, can strengthen the brain and intelligence, replenish qi and nourish blood, moisturize phlegm, prevent cancer and fight cancer, is an agricultural product with a long history of cultivation and rich nutritional value in China, and has the reputation of “long live son” and “longevity fruit”. However, in the process of growth and processing of walnuts, affected by factors such as origin, variety, climate, storage environment, processing equipment and other factors, it is easy to cause different walnut quality, and even mildew, pests and deterioration, etc., affecting walnut quality and subsequent deep processing. In order to ensure the quality of walnut products, walnuts need to be detected and graded, and non-destructive testing technology can detect them efficiently and quickly without damaging the walnuts themselves, avoiding sample composition and nutrient loss during the testing process, so it is widely used in walnut testing. This paper summarized the three non-destructive testing technologies, compared and analyzed the advantages and disadvantages of 3 kinds of non-destructive testing technologies, summarized the application research progress of non-destructive testing in walnut-related testing from four aspects: Origin variety detection, internal quality testing, external defect detection and foreign body classification detection, puts forward the problems existing in walnut-related testing, and looks

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52165038)、云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0764)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (52165038), and the Scientific Research Fund of Yunnan Provincial Department of Education (2023Y0764)

**\*通信作者:** 李玮, 博士, 教授, 主要研究方向为机电一体化控制技术、智能制造技术、工业设计。E-mail: 772074913@qq.com

**\*Corresponding author:** LI Wei, Ph.D, Professor, College of Mechanical Engineering and Transportation, Southwest Forestry University, No.300, Bailong Temple, Panlong District, Kunming 650224, China. E-mail: 772074913@qq.com

forward to the development prospects of walnut nondestructive testing research, providing a reference for the application of non-destructive testing technology in walnut related fields.

**KEY WORDS:** variety and quality testing; non-destructive testing; walnut

## 0 引言

核桃又称胡桃, 现广泛栽培和分布于我国云南、山西、新疆等 24 个省区。核桃品种多样、食味香纯、口感细腻、出油率高, 它含有我们人体所必需的微量元素、矿物质、维生素等, 能够健脑益智、补气养血、润燥化痰、防癌抗癌等, 具有较高的经济价值和营养价值<sup>[1]</sup>。但是在核桃生长和处理过程中, 受气候、虫害、储存环境、处理设备等因素的影响, 会出现品质不一, 甚至霉烂、虫害、变质的现象, 不仅影响其感官品质而且降低了其营养价值及油脂品质, 甚至会产生对人体有害的毒素<sup>[2]</sup>, 因此对核桃进行检测及分类对促进核桃产业发展有着重要作用。

近年来, 无损检测技术因其无损性被广泛应用于农产品检测<sup>[3-4]</sup>, 在植物种类鉴别, 大豆、小麦等农产品种子的检测与分级<sup>[5-6]</sup>, 农作物成熟后的饱满程度、形状、外表颜色和外形损伤程度的检测与分级等方面发挥了强大的功能。在核桃检测方面, 无损检测主要应用于核桃产地品种检测、内部品质检测、外部缺陷检测和异物分类检测中, 并且能够有效实现识别分类, 但由于核桃品种多样, 目前只能针对少数品种进行检测, 存在检测单一、检测效率和检测精度差、静态检测等问题, 而且由于检测中需要对核桃样品进行前处理, 耗费大量人力物力, 致使检测效率低下。本文总结、分析了近年光谱检测技术、机器视觉检测技术、X 射线成像技术在核桃无损检测中的各项研究成果, 指出了核桃无损检测中存在的问题并给出了一定的解决办法, 同时对核桃无损检测研究的发展前景进行展望, 以期对核桃无损检测应用研究提供参考。

## 1 无损检测技术简介

### 1.1 无损检测技术

无损检测是指在不损害被测对象使用性能和内部组

织的前提下, 对被测对象进行缺陷检测的技术手段, 技术流程如图 1 所示。无损检测具有成本低、无危害、无污染、检测灵敏度高、适应性强等特点, 能够有效避免检测过程中样品成分和营养损失, 与破坏性检测相比, 无损检测可实现 100% 全面检测<sup>[7]</sup>, 因此被广泛应用于农产品检测中。目前应用比较广泛的无损检测技术包括光谱检测技术、机器视觉检测技术、X 射线成像技术, 它们广泛应用在农产品的产地品种鉴别、内外品质检测、外部缺陷检测、异物分类检测等方面。

光谱检测技术分为高光谱成像技术和红外光谱技术。高光谱成像技术是在连续的光谱波段内以非常多窄的光谱间隔成像的影像数据技术, 它融合了传统成像和光谱技术的优点, 具有较宽的测试带宽和图谱合一的特点, 可以同时获取被检测物体的空间信息和光谱信息<sup>[8]</sup>, 因此该技术应用于食品安全、医学诊断、农业等领域<sup>[9-11]</sup>, 用于物体的内外部品质和安全检测; 红外光谱<sup>[12]</sup>是一种利用物质对光的吸收、反射和透射等特性来确定其种类或成分含量的技术, 覆盖波段为 0.75~1000  $\mu\text{m}$ , 包含近红外、中红外和远红外光谱<sup>[13]</sup>。它能应用于大多类型的样品中, 能够检测核桃内部活性成分及营养元素含量, 并可同时对样品多个组分进行定性和定量分析, 广泛应用于农产品、水果、坚果、烟草检测等领域<sup>[14-16]</sup>。

机器视觉技术是一种运用计算机模拟人的视觉功能的技术。它可以快速获取大量信息, 能够自动处理, 同时设计信息以及加工控制信息集成。在现代自动化生产过程中, 将机器视觉技术应用于成品检验和质量控制等领域<sup>[17-18]</sup>。在农产品检测中, 利用机器视觉技术对农产品进行异物分类检测, 可以同时检测大小、形状、颜色及表面缺陷等多种指标<sup>[19]</sup>。目前, 针对核桃产品, 机器视觉技术多用于核桃外部缺陷检测以及异物分类检测。

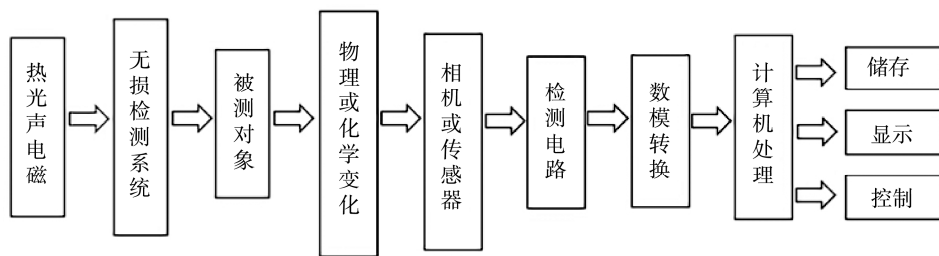


图 1 无损检测流程图

Fig.1 Nondestructive testing flow chart

X射线成像技术能同时显示多种图像,还可利用图像处理技术改善图像质量,其透射性可以透视出肉眼无法看到内部结构,并且不会有任何辐射残留,不存在对人体构成辐射伤害的可能性<sup>[20]</sup>,目前广泛应用于医疗、安检、工业探伤、食品检测<sup>[21-22]</sup>等领域。在核桃检测中,X射线成像技术可以分辨核桃产品内部结构变化,在品质筛选和分类上得到了广泛的应用。

## 1.2 无损检测技术对比

现今无损检测常用技术主要有光谱检测技术、机器视觉检测技术、X射线成像技术3种。这3种无损检测技术都是通过对样品进行图像获取、处理、分析来实现对样品的缺陷检测。它们的检测部位及优缺点如表1所示。

高光谱成像技术可以将样品的外部特征和内部特性通过图像呈现出来并进行处理,具有取样量少、无损等特点。但受到数据维度和数据处理速度的限制,无法准确识别微小的内部成分含量差异;红外光谱技术可以实现对有机物样品分子组成、品质组分等内部结构的定量检测,能够运用于大多数类型,具有适用性强、无损、前处理简单等特点。但其检测灵敏度受热辐射率、试件表面、背景辐射、缺陷大小、埋藏深度的影响,对原试件分辨率差,不能测定缺陷的形状、大小和位置。

机器视觉检测技术不仅能够针对样品进行外部检测,同时还可以提取特征创建模型进行分类检测,具有速度快、信息量大、智能等优点,但不是所有产品都能检测,且系统相对复杂,成本较高。

X射线成像技术能够检测到样品内部存在的缺陷或者异物,相比于其他检测技术,它几乎适用于所有物品,能够直观地显示缺陷图像,并对其进行定性、定量和定位,但其对平面缺陷的检测灵敏度较低,当射线方向与平面缺陷垂直时很难检测出结果,除此之外,射线对人体有害,需要有保护措施。

## 2 无损检测技术在核桃检测中的研究现状

目前无损检测技术开展了核桃的产地检测、品种检

测、内部品质检测、外部缺陷检测、异物分类检测等方面的应用,取得了一定的研究成果,并在核桃的信息获取、数据处理、模型建立与应用等方面有了很大的进展。

### 2.1 产地、品种检测

根据产地、成熟期、果壳厚度等不同,可以划分为多种核桃品种,不同品种的核桃在不同地区的各种营养成分上存在一定的差异,口感也不同,而且不同品种的核桃由于其颜色、形状、大小不同,也给其在加工上带来一定的差异,采用相同的加工设备就会影响核桃的品质和利用价值。为了进一步提升优良品种核桃的商品价值,在加工之前对核桃的品种进行鉴别是很有必要的。

在产品品种检测上,红外光谱技术相对于机器视觉检测技术和X射线成像技术在准确率和种类数量上有着一定的优势。NOGALES-BUENO等<sup>[23]</sup>利用3种不同的近红外光谱设备对核桃进行光谱采集实验,实现了核桃品种鉴别。该方法证明了红外光谱技术能够有效鉴别核桃品种,为今后核桃品种鉴别的研究提供了思路。在光谱范围上,红外光谱大约在 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 之间,在数据前处理上有多元散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)、标准正态变换和第一导数(standard normal variate transform and first derivative, SNV-FD)、小波变换(wavelet transform, WT)等多种方法。ARNDT等<sup>[24]</sup>对212个干核桃样品进行鉴定,建立了线性判别分析模型,使用MSC进行数据处理,结果显示,准确度只有77%。这表明MSC预处理方法虽然能够很好地消除由于散射水平不同带来的光谱差异,但对分类精度产生很大的影响,由此可见预处理方法对有效分类的重要性。

在进行预处理之后,还需运用化学计量学算法进行模型构建,常用方法有主成分分析法(principal component analysis, PCA)、极限学习机(extreme learning machine, ELM)、偏最小二乘法判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)、反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)等多种方法。夷娜<sup>[25]</sup>对3个地区的37个核桃品种进行判别,通过化学计量学分析,

表1 无损检测技术优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of nondestructive testing technology

名称	检测部位	优点	缺点
高光谱成像技术	外部、内部	具有图谱合一、取样量少、操作简单、无损、适合在线处理等特点。	对于内部成分含量微小的差异无法精确体现,数据维度高、数据处理速度较慢等。
红外光谱成像技术	内部	具有适用性强、无损、前处理简单、操作简便、环保、成本低、高效等特点。	分辨率差,不能测定缺陷的形状、大小和位置等。
机器视觉技术	外部	具有速度快、信息量大、功能多、分级准确、无损伤、智能化程度高等优点。	系统相对复杂,成本较高。
X射线成像技术	内部	几乎适用于所有材料,能够直观地显示缺陷图像,并对其进行定性、定量和定位。	对平面缺陷的检测灵敏度较低,射线对人体有害。

建立 PLS-DA 模型, 能够实现对不同产地的有效划分, 并且准确率较高; AMENDOLA 等<sup>[26]</sup>对索伦托以及其他地区的核桃壳、仁进行光谱扫描, 建立 PLS-DA 模型, 准确率达 98.30%。以上两种都是运用 PLS-DA 模型来进行产地品种分类, 该方法是现今常用的化学计量学算法, 能够有效实现类判别并且准确率较高。相比之下, 何勇等<sup>[27]</sup>对 4 个产地的 10 个核桃品种进行判别, 将无信息变量消除法 (uninformative variable elimination, UVE) 与连续投影算法 (successive projections algorithm, SPA) 结合对 WT 去噪后的光谱提取特征波数, 并建立 BPNN 分类模型, 实现了 10 个品种和 4 类产地的准确判别。该学者将小波变换、特征波数与化学计量学算法进行结合, 降低了变量, 有效简化了计算量, 但在精确度上 BPNN 有所不足。

目前红外光谱技术只是针对部分核桃产地的部分品种进行了鉴别, 还需要加大对其他品种的鉴别研究, 建立可以适用于绝大多数品种的判别模型。在进行研究时, 需要人工来对核桃进行前期处理, 包括研磨、加入化学晶体等, 这方面可以研制一些加快前期处理的装置。该技术在不同产地同一品种研究时判别准确率较高, 但对于不同品种同一产地的研究, 存在对于同一原始数据, 在多类品种监督值下选取的特征波数无法适用于其产地的判别问题, 所以今后还需探究同一物质光谱特征波数的建模共享问题。

相比于红外光谱技术, 机器视觉技术和 X 射线成像技术在检测方式上存在一定的优势, 这两种检测手段都不需要对核桃样品进行复杂的前期加工处理, 而且可以直接对核桃本身进行产地品种检测, 但是在品种上还是存在只针对一些特殊品种的现象。张三林等<sup>[28]</sup>采用机器视觉技术对 3 种南疆核桃进行品种检测研究, 采用 YOLOv5 网络模型, 路径聚合网络特征融合方法, 结果显示, 3 种核桃的检测精度为 97%, 单幅图像的检测时间为 7 ms。该研究为机器视觉检测技术在核桃品种检测方面提供了研究思路, 虽然在准确率上相对于红外光谱技术略有不足, 但在检测效率上大大提高, 可以达到对核桃实时检测的需求。

除了单纯的机器视觉技术检测, 目前还有学者将机器视觉技术与其他两者技术相结合进行研究。ZHU 等<sup>[29]</sup>将机器视觉技术与红外光谱技术结合, 通过建立 BPNN 模型实现对 10 个品种核桃的检测, 同一产地的核桃鉴别准确率最高。该研究证明了机器视觉技术与红外光谱技术相结合可以实现核桃品种检测, 但存在不同产地不同品种分类效果不明显的现象, 并且在检测效率与检测精度上都有所欠缺。高庭耀等<sup>[30]</sup>将机器视觉技术与 X 射线成像技术相结合, 提取 59 个纹理特征参数和 12 个形态特征参数, 利用极限学习机建立了 3 种核桃的双品种判别模型和多品种判别模型, 判别率达到 88.76%。机器视觉与 X 射线成像相结合, 虽然能够对核桃内部进行投射, 但在提取特征方面的计算量并没有减少, 而且在准确率上也有所降低。以上

两种方式都为实现核桃品种自动分选提供了新的研究方向, 但相比于单纯的检测技术, 在复杂程度上都有所提升, 在未来可能需要将深度学习算法融入其中, 以提高准确率和效率。

## 2.2 内部品质检测

核桃作为我国优势农产品之一, 种植广泛, 大部分地区以家庭为单位进行种植, 由于种植方法、种植标准、生长环境不同, 不同的产地及品种核桃的外观性状及理化特性也有差异<sup>[31-32]</sup>。根据国家坚果品质衡量标准, 水分、蛋白质和脂肪等的含量都是衡量核桃品质的重要标准<sup>[33]</sup>。例如水分含量过高, 易发生水解致使酸价增高, 水分含量过低, 影响口感。除此之外, 采收后核桃成熟度的差异使核桃干制后, 核仁皱缩出现空果和干瘪果。因此, 对核桃品质的监测更好地保证产品的营养成分, 有助于优化核桃加工、储藏的方式。

光谱检测技术可以准确检测核桃内部活性成分及营养元素含量, 并可同时对样品多个组分进行定性和定量分析。在内部品质检测上最常用的是红外光谱技术, 主要是检测内部水分、蛋白质和脂肪的含量, 通过化学提取测量核桃内部成分, 进行光谱预处理, 建立核桃内部含量预测模型, 以此来实现对核桃的内部品质检测。在光谱范围上, 红外光谱大约在 570~2560  $\text{cm}^{-1}$  范围内。YI 等<sup>[34]</sup>运用 MSC 进行预处理, 并建立核桃内水分、蛋白质和脂肪含量的 PLS 预测模型, 结果显示, 3 种含量的平均预测系数为 0.973, 标准误差为 0.143。由此可见, 近红外光谱技术可以实现对核桃内主成分的预测, 但与品种检测有相同的问题, MSC 的预处理方法使预测模型出现了误差偏大的现象。相比之下, PENG 等<sup>[35]</sup>运用 SNV-FD 预处理方法, 建立核桃仁水分 PLS 预测模型, 结果显示, 预测模型的平方相关系数和根平均平方误差分别为 0.9865 和 0.0017, 在改变预处理方法的前提下, 误差相对减小, 说明预处理方法对预测模型的误差有一定的影响, 而且 SNV-FD 预处理方法在内部检测上要明显优于 MSC 方法。

在对核桃仁内部蛋白质、脂肪含量检测上, 马文强等<sup>[36-38]</sup>做了大量的研究。他们前期采用近红外光谱技术对核桃仁蛋白质含量进行预测研究, 运用 MSC 和 SNV 进行预处理, 用间隔 PLS 进行特征波段筛选, 并建立核桃仁蛋白质含量 PLS 预测模型, 取得了较好的成果。其中特征波段筛选可以有效简化模型, 降低计算量和复杂程度, 提高检测速度。为了提高检测速度和精确度, 在中期他们改变了模型方法, 运用支持向量机回归算法进行检测, 结果显示误差降低, 精确度有所提高, 但以上两种都不能实现对被测样品外观与内部品质信息的同时反映。为了进一步提高检测精度, 降低误差, 确定内外品质的一致性, 选用高光谱成像技术对核桃仁蛋白质、脂肪含量进行预测研究,

在不改变预处理方法以及模型算法的前提下,运用竞争性自适应重加权采样算法与相关系数法相结合的方法进行特征波段筛选,使精确度得到了进一步的提升,除此之外,高光谱成像的内外部皆可检测的特性也使其可以实现内外部的同时检测与分类。

在核桃内部检测上,红外光谱大约在  $570\sim 2560\text{ cm}^{-1}$  范围内,该光谱检测技术需要人工运用化学方法对每个核桃样品进行内部物质含量提取,以此建立不同的核桃品种数据库,来对核桃内部进行检测,对此可以对核桃进行前期处理设备研发,解放劳动力,提高效率,同时扩大样品集的大小,提高模型的性能和适用性。现今针对核桃成分含量的定量检测大多是单一指标,如蛋白质、脂肪、水分等,需要对核桃进行综合指标研究,探究它们之间存在的关系,并针对核桃内部各指标建立多变量、多特征信息融合的定量分析模型。

X 射线成像技术以及机器视觉技术主要是检测核桃内部是否出现空果和干瘪果。机器视觉技术在核桃内部检测中主要是通过核桃重量来实现其分类检测。金作徽等<sup>[39]</sup>设计了一种核桃在线称重系统,将加速度传感器信号和称重传感器信号融合,通过支持向量回归较准确地实现了核桃质量的在线检测。同样的,于大国等<sup>[40]</sup>运用机器视觉技术对下落的核桃进行图像采集、处理、拟合,以此来估算核桃体积,再称取核桃重量,根据核桃比重来实现核桃品质检测。这种方法虽然可以做到对核桃内部的检测,但该检测方法效率较低,需要对不同品种不同大小的核桃进行分类计算,复杂程度较高,存在一定的局限性。

X 射线成像技术内部检测中多与机器视觉技术相结合,运用 X 射线的穿透性来分析内部结构,可以有效观察到内部存在的核桃仁大小,运用机器视觉技术可以提取特征建立模型,以此来实现分类检测。陈才燕<sup>[41]</sup>将 X 射线成像技术与机器视觉技术相结合,对核桃果实和果仁进行三维可视化重建,通过核桃果实饱满度的定义与计算方法进行计算检测,实现对核桃内部品质的无损检测。为了进一步提高准确度和检测效率,运用深度学习方法搭建检测模型,张淑娟等<sup>[42]</sup>将 X 射线成像技术结合卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)对图像进行采集处理,建立深度神经网络模型,准确率最高达到 96.67%,同时模型耗时少且收敛稳定。该方法实现了对核桃内部品质的检测与分类,并且在准确度以及检测效率上相比于传统网络模型更高,说明深度学习算法能有效提高检测准确率和检测效率,该方法为核桃内部品质检测与分类提供了一定的研究方向。

X 射线成像技术与机器视觉技术相结合的方法能够大幅度提高检测精确度、准确率和检测时间,能够较好地识别空果和干瘪果,但研究较少,今后可以加大对 X 射线与深度学习的研究。X 射线成像技术无法识别同等大小的

变质坏果,有一定的局限性,可以考虑运用筛选装置,根据核桃比重来进行坏果筛选。

### 2.3 外部缺陷检测

在核桃生长和初加工过程中,核桃受气候、虫害、储存环境、处理设备等因素的影响,会出现外观缺陷(黑斑、裂纹、碎壳)<sup>[43]</sup>等现象,黑斑一是在青皮剥离过程中处理不当造成的,表皮残留青皮且清洗不净,从而氧化形成,二是因为核桃受到了病虫害危害,影响外观品质,降低等级。破而裂纹或碎壳,会使内部核桃仁与外界直接接触,当外界真菌和水汽进入核桃内部,会导致果仁霉变,甚至滋生黄曲霉素等有害物质。因此需要对其进行外部缺陷检测,剔除不好的产品。

在缺陷检测中,机器视觉技术能够通过对核桃进行预处理、图像分割、提取颜色纹理特征,建立判别模型对核桃外部缺陷进行识别。其中,图像分割方法在缺陷检测中占据重要地位,现今常用的传统分割方法包括基于阈值的分割方法、基于区域的图像分割方法、基于边缘检测的分割方法。刘军等<sup>[44]</sup>设计一种自适应双阈值图像分割法分割核桃图像的缺陷区域,提取原始 20 个特征信息,建立基于径向基的支持向量机的识别模型,实现了 3 种核桃的外部缺陷检测,识别率达 90.21%,识别时间为  $10^{-4}\text{ s}$ 。这表明机器视觉技术可以实现对外部缺陷的检测,阈值分割的算法虽然能有效识别外部缺陷,但准确率较低。

为进一步提高准确率,需要对分割方式进行改进,结合特定算法进行图像分割,例如基于小波分析和小波变换的图像分割方法、基于遗传算法的图像分割、基于主动轮廓模型的分割方法、基于深度学习的分割等。张新伟等<sup>[45]</sup>采用 6 尺度数学形态学方法检测核桃的表面缺陷,通过建立不同结构形态学算子的边缘提取,以及计算加权算子的方式进行边缘图像的融合,准确率为 94%,时间为 15.774 s。该方法有效克服了传统边缘检测算子对核桃外部缺陷边缘提取不准确的问题,使得准确率大幅度提升,但检测时间过长,需要对算法性能及程序编码进行优化,提高检测效率。相比之下,殷文俊等<sup>[46]</sup>借助遗传算法的解空间随机搜索能力,以最大类间方差法的方差作为遗传种子进行遗传运算,得到核桃裂纹分割的最佳阈值,实现核桃表面裂纹的检测,准确率为 96%,时间为 0.54 s。该方法不仅能够实现准确分割,提高检测准确度,而且大幅度降低了检测时间,提高了检测效率。

目前运用机器视觉技术能够有效识别核桃外部缺陷检测,但在多种缺陷检测情况下识别准确率不高,而且算法存在一定的局限性,对图像缺陷分割多采取传统图像分割方式,不能有效分割,影响检测精度和检测效率。所以今后可以考虑将传统分割方式与特定算法相结合,探究各种缺陷之间存在的区别与联系,建立多缺陷多特征判别模

型,有效提高识别率和识别速度。

与机器视觉相比,高光谱成像技术具有分辨率高、多波段、图谱合一等优点,对缺陷识别具有更高的精确度,它通过采集光谱信息,提取缺陷处的光谱信息,定性分析,建立缺陷判别模型来实现对核桃的外部缺陷检测。李成吉等<sup>[47-48]</sup>前期运用计算机视觉技术,通过形态逻辑学算法获取样本投影面积,并建立最小二乘支持向量机和多项式回归方程质量预测模型,实现了对正常、黑斑和破裂核桃的快速识别,总体的判别率为 88.9%。但运用该分割方法和模型创建算法识别率较差,需要进一步改变提取缺陷特征参数的方法。为探究更多的可能性,选用高光谱成像技术结合机器视觉技术。在后期运用 PCA 对光谱数据进行压缩,提取前 5 个主成分,建立 PLS 模型,结果显示,模型对正常和黑斑核桃识别率达到 100%。由于正常核桃与黑板核桃反射率存在很大差别,所以能够有效识别外部缺陷,该方法为外部缺陷检测提供了新的方向。

目前基于高光谱成像技术的缺陷检测研究还比较少,且类型比较单一,所以今后需加大对多品种多类型缺陷检测的研究,探究各种缺陷光谱信息之间存在的区别与联系,并针对不同缺陷建立定量分析模型。

## 2.4 异物分类检测

核桃在产品加工中往往会混入一些杂质,影响核桃品质和价值。目前,核桃破壳技术尚不成熟,无论是机械破壳还是人工破壳,都会导致核桃仁碎裂<sup>[49]</sup>。而且在核桃运输过程中,受加工环境影响,会存在如金属、毛发、玻璃等异物,这就需要将破壳后的混合物料(破碎的外壳、内隔、核桃仁、以及异物)进行分选,以便后续进行深加工。因此,进行核桃异物分类检测对于核桃壳、仁及其分心木的分类识别以及异物剔除,提高产品质量具有重要价值。

在异物分类检测上,光谱技术多用于核桃壳、仁、分心木的检测。WANG 等<sup>[50]</sup>运用远红外光线太赫兹光对核桃壳、仁进行分类检测,运用 PCA 比较不同浓度的核桃仁和核桃壳的典型吸收光谱来实现光谱分类,并用太赫兹成像对核桃壳、仁进行定位,准确率在 95%以上。该方法证明了红外光谱技术能够通过不同结构的吸收光谱成分来进行区分,准确率较高,并可做到对图片中不同物品的精确定位,但该方法比较复杂,且无法实现动态检测。在高光谱成像技术上,陈彩虹等<sup>[51]</sup>采用竞争自适应重加权算法(competitive adaptive reweighted sampling, CARS)、回归系数法(regression coefficients, RC)和 SPA 进行特征波长提取,建立 PLS 模型,准确率达 99.6%,由此可见高光谱成像技术对进行分选判别是可行的,相比于红外光谱技术,在复杂程度上明显降低,在准确率和检测效率上大大提高,但其并不能做到对物品的定位。

机器视觉技术主要是通过通过对不同混合物进行图像采集、预处理、特征提取,模型构建来进行分类识别。RONG

等<sup>[52]</sup>运用深度学习两级卷积网络构建核桃内金属、碎片等异物分类检测模型,实现了核桃图像分割和分类检测,分割图像准确率为 99.4%,异物分类准确率为 96.5%,处理速度为 60 ms。由此可见,运用机器视觉技术能够有效识别核桃产品中存在的杂质异物,而深度学习可以大幅度提高准确率和检测速度。机器视觉技术不止用于金属、毛发、碎片等异物检测,还用于核桃壳、仁、分心木的检测。李文宝等<sup>[53]</sup>运用深度学习算法对山核桃破壳后的物料进行分类,对比 3 种神经网络模型,得到 VGG16 模型对破壳物料(较完整壳仁未分、露仁等)分类效果极好,准确率达到 99.5%。这表明相对传统神经网络模型,深度学习的方法能更准确地进行分类,在精确度和检测效率上有较好的优越性。

为进一步提高核桃仁分类识别的准确性和实时性,需对深度学习的卷积神经网络模型进行改进和优化。赵腾飞等<sup>[54]</sup>基于 CNN 对原始结构模型进行参数优化设计及结构调整实现核桃仁分类识别,准确率为 99.44%,平均执行时间为 29.6 ms。相比未经过推理优化的卷积网络模型,该学者经过优化后的模型在准确率以及实时性方面都有所提升,且执行时间提升 10 倍左右,能够较好地满足核桃仁的分类识别,具有一定的适用性。

除此之外,高光谱成像技术也有与机器视觉技术相结合的例子,冯喆等<sup>[55]</sup>采用 MSC 预处理方法,建立二维卷积神经网络山核桃内源性异物的检测模型,实现对山核桃壳仁的正确分类,正确率为 98.5%。这表明该方法能够有效识别壳仁并进行分类,且准确率较高,这为异物分类检测提供了新的方向,但在方法上较为复杂,效率较低,需要对其算法方式进行改进,提高检测效率。

目前针对核桃的异物分类检测还停留在部分检测中,例如核桃壳、仁、分心木分类检测或半仁、四分之一仁、坏仁分类检测,对金属、毛发、玻璃等异物的检测较少,所以今后需要整合异物检测,建立多样多特征的检测模型。除此之外,针对核桃的异物分类检测大多是以静态的检测方式开展,无法实现多样本动态检测,需要加入核桃混合物定位算法,进行精确定位,以便后期进行分类剔除。

## 3 结束语

本文总结了 3 种无损检测技术,介绍了其基本原理和特点,对比分析了 3 种无损检测技术的优缺点,并对其在核桃的 4 种检测中的应用现状进行了总结分析,提出了相应的问题及解决方案。无损检测具有非破坏性、全面性特点,成本低、无危害、无污染、检测灵敏度高、适应性强。目前,无损检测技术日趋完善并应用于各个领域,尤其是农产品的核桃检测方面,能够有效提高核桃加工过程中的精度和效率,进而提高核桃产品检验水平。

目前,针对核桃产品的无损检测还存在以下几点问题:

(1)核桃品种检测只是针对部分产地部分品种进行了鉴别,品种稀少,无法适用于大多数品种鉴别;在进行研究时,光谱技术需要对研究核桃进行前期处理,包括研磨,加入化学晶体等,耗费大量人力物力;在多品种鉴别时,对不同品种同一产地的研究,存在对于同一原始数据,在多类品种监督值下选取的特征波数无法适用于其产地的判别问题,不同产地不同品种研究较少;在多种技术相结合时存在复杂程度高,检测效率低的问题。

(2)核桃内部品质检测在进行内部检测时,需要人工运用化学方法对每个核桃样品进行内部物质含量提取,以此来建立不同的核桃品种数据库,会耗费大量的人力和物力;针对核桃成分测量大多是单一指标,如蛋白质、脂肪、水分等,无法从多方面来综合判定核桃品质;内部品质检测目前多为内部含量指标检测,对空果和干瘪果识别研究较少,检测效率较低,复杂程度较高,存在一定的局限性,无法对同等大小的变质果进行鉴别。

(3)核桃外部缺陷检测大多是针对单一缺陷类型,如黑斑、裂纹等,多缺陷检测较少;在多种缺陷检测情况下识别准确率不高,在算法上存在一定的局限性,图像缺陷分割多采取传统图像分割方式,不能有效分割。

(4)核桃异物分类检测还停留在部分检测中,只针对其中的一部分,例如核桃壳、仁、分心木分类检测或半仁、四分之一仁、坏仁分类检测,对金属、毛发、玻璃等异物的检测较少;针对核桃的异物分类检测无法从多方面来进行分类,而且大多是以静态的检测方式开展,无法实现多样本动态检测。

综上所述,未来需针对红外光谱技术中核桃样本处理研发相应的前期处理装置,从而解放劳动力,提高效率。同时在核桃相关检测中,需要扩大样品集的大小,加入更多品种、更多指标,更多类型的核桃相关数据,综合探究各指标之间存在的关系,并针对核桃内部各指标建立多变量、多特征信息融合的通用型定量分析模型,提高模型的性能和适用性。要加大动态检测研究,加入目标检测算法,实行精准定位,实现多样本动态检测,使其适用于真实生产,以便后期进行分类剔除。除此之外,还需对商品的检测方式进一步研究,将几种检测方式与深度学习相结合,对预处理、图片分割、特征提取、定量分析、特征模型等相关算法进行进一步优化,综合检测核桃产品质量,提高检测精度和效率,打造机械一体化生产线,使核桃相关检测向着数字化、自动化、便捷化、多元化发展,将是未来研究的主要方向。

## 参考文献

- [1] 马庆国,乐佳兴,宋晓波,等. 新中国果树科学研究 70 年—核桃[J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1360-1368.  
MA QG, LE JX, SONG XB, *et al.* 70 years of scientific research on fruit

- trees in New China—Walnut [J]. *J Fruit Sci*, 2019, 36(10): 1360-1368.
- [2] 摆小琴,张娅俐,洪晶,等. 坚果品质检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(22): 8737-8744.  
PENG XQ, ZHANG YL, HONG J, *et al.* Research progress in the methods of detecting the quality of nuts [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(22): 8737-8744.
- [3] 史勇,郭俊先,李雪莲,等. 哈密瓜无损检测技术及分级装备的研究现状和发展趋势[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(6): 75-82.  
SHI Y, GUO JX, LI XL, *et al.* Research status and development trend of cantaloupe nondestructive testing technology and grading equipment [J]. *Packag Food Mach*, 2021, 39(6): 75-82.
- [4] 杨杰错,郭志强,黄远. 高光谱成像在蔬菜性状无损检测中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 23-34.  
YANG JK, GUO ZQ, HUANG Y. Research progress of hyperspectral imaging in nondestructive detection of vegetable traits [J]. *Laser Optoelectron*, 2022, 59(10): 23-34.
- [5] 金诚谦,刘士坤,陈满,等. 采用改进 U-Net 网络的机收大豆质量在线检测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 70-80.  
JIN CQ, LIU SK, CHEN M, *et al.* On-line detection of machine-harvested soybean quality using improved U-Net network [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2022, 38(16): 70-80.
- [6] 王明,张倩. 近红外技术在玉米品质检测中的应用[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 221-226.  
WANG M, ZHANG Q. Application of near-infrared technology in maize quality detection [J]. *Food Ind*, 2020, 41(4): 221-226.
- [7] 罗印斌,蔡艳丽,兰茜,等. 农产品无损检测方法应用现状[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 340-344.  
LUO YB, CAI YL, LAN H, *et al.* Application status of non-destructive testing methods for agricultural products [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(15): 340-344.
- [8] MANIFOLD B, MEN S, HU R, *et al.* A versatile deep learning architecture for classification and label-free prediction of hyperspectral images [J]. *Nat Mach Intell*, 2021, 3(4): 306-315.
- [9] QU JH, LEI J, LI YS, *et al.* Structure tensor-based algorithm for hyperspectral and panchromatic images fusion [J]. *Remot Sens-Basel*, 2018, 10(3): 373.
- [10] 李威,黄云峰,代作晓,等. 基于高光谱成像技术无损检测芒果轻微损伤[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 98-104.  
LI W, HUANG YF, DAI ZX, *et al.* Nondestructive detection of minor damage to mango based on hyperspectral imaging technology [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(1): 98-104.
- [11] 吴习宇,曾凯芳,郭启高,等. 基于高光谱成像的枇杷果实品质检测[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(9): 52-60.  
WU XY, ZENG KF, GUO QG, *et al.* Quality detection of loquat fruit based on hyperspectral imaging [J]. *J Southwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2022, 44(9): 52-60.
- [12] DAOU S, BOU-MAROUN E, WASCHATKO G, *et al.* Detection of lipid oxidation in infant formulas: Application of infrared spectroscopy to complex food systems [J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1432.
- [13] 焦俊,圣阳,王标,等. 光谱技术在核桃检测领域的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 36-46.  
JIAO J, SHENG Y, WANG B, *et al.* Research progress of spectroscopic technology in the field of walnut detection [J]. *Laser Optoelectron*, 2021,

- 58(22): 36–46.
- [14] LI CB, XIAO ZS. Application of near infrared spectroscopy technology in agricultural product [J]. *Mod Anim Husb*, 2020, 4(2): 51–54.
- [15] 关晔晴, 王冬, 李楠, 等. 基于近红外技术无损检测深州蜜桃果实内部品质[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(10): 290–296.  
GUAN YQ, WANG D, LI N, *et al.* Nondestructive testing of internal quality of Shenzhou peach fruit based on near-infrared technology [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(10): 290–296.
- [16] 王贤, 华震宇, 何伟忠. 红外光谱技术在红枣农药残留检测中的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(13): 4394–4400.  
WANG X, HUA ZY, HE WZ. Research progress of infrared spectroscopy in the detection of pesticide residues in red jujube [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(13): 4394–4400.
- [17] 卢军党, 刘东琴, 田智辉. 机器视觉技术在核桃分级检测中的应用[J]. *农产品加工*, 2020, (20): 106–107, 110.  
LU JD, LIU DQ, TIAN ZH. Application of machine vision technology in walnut grading detection [J]. *Farm Prod Process*, 2020, (20): 106–107, 110.
- [18] 贺旖琳, 陶肖. 基于机器视觉的手机玻璃盖板缺陷检测与分拣系统[J]. *工业控制计算机*, 2022, 35(12): 74–75, 79.  
HE YL, TAO X. Defect detection and sorting system of mobile phone glass cover based on machine vision [J]. *Ind Control Comp*, 2022, 35(12): 74–75, 79.
- [19] 窦文卿, 柴春祥, 鲁晓翔. 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 354–359.  
DOU WQ, CHAI CX, LU XX. Research progress on the application of non-destructive testing technology in fruit quality evaluation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(24): 354–359.
- [20] 顾丰颖, 丁雅楠, 朱金锦, 等. 基于稻谷 X 射线荧光光谱测定快速识别糙米和精米中的镉含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 8018–8025.  
GU FY, DING YN, ZHU JJ, *et al.* Rapid identification of cadmium content in brown rice and polished rice based on X-ray fluorescence spectroscopy of paddy [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(20): 8018–8025.
- [21] 冯辰越, 黄慧, 马燕. 一种基于 X 射线成像的球栅阵列封装芯片焊接检测方法[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(4): 408–412.  
FENG CY, HUANG H, MA Y. A soldering detection method for spherical grid array package chip based on X-ray imaging [J]. *J Shanghai Normal Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 50(4): 408–412.
- [22] 洪旭东, 王超, 张德钧, 等. 光谱检测技术在食品安全检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(11): 2684–2689.  
HONG XD, WANG C, ZHANG DJ, *et al.* Application of spectral detection technology in food safety detection [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(11): 2684–2689.
- [23] NOGALES-BUENO J, FELIZ L, BACA-BOCANEGRA B, *et al.* Comparative study on the use of three different near infrared spectroscopy recording methodologies for varietal discrimination of walnuts [J]. *Talanta*, 2020, 206: 120189.
- [24] ARNDT MK, DREES A, AHLERS C, *et al.* Determination of the geographical origin of walnuts (*Juglans regia* L.) using near-infrared spectroscopy and chemometrics [J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1–5.
- [25] 夷娜. 新疆核桃品质地域差异性及其溯源技术研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2018.
- YI N. Research on regional differences in walnut quality and traceability technology in Xinjiang [D]. Alar: Tarim University, 2018.
- [26] AMENDOLA L, FIRMANI P, BUCCI R, *et al.* Authentication of sorrento walnuts by NIR spectroscopy coupled with different chemometric classification strategies [J]. *Appl Sci*, 2020, 10(11): 4003.
- [27] 何勇, 郑启帅, 张初, 等. 基于中红外光谱和化学计量学算法鉴别核桃产地及品种[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(9): 2812–2817.  
HE Y, ZHENG QS, ZHANG C, *et al.* Identification of walnut origin and variety based on mid-infrared spectroscopy and chemometric algorithm [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2019, 39(9): 2812–2817.
- [28] 张三林, 张立萍, 郑威强, 等. 基于 YOLOv5 的核桃品种识别与定位[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(7): 167–172.  
ZHANG SL, ZHANG LP, ZHENG WQ, *et al.* Identification and localization of walnut varieties based on YOLOv5 [J]. *J Chin Agric Mech*, 2022, 43(7): 167–172.
- [29] ZHU HY, XU JL. Authentication and provenance of walnut combining Fourier transform mid-infrared spectroscopy with machine learning algorithms [J]. *Molecules*, 2020, 25(21): 1–5.
- [30] 高庭耀, 张淑娟, 孙鹏, 等. 基于 X 射线图像的核桃品种识别方法研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(11): 284–288.  
GAO TY, ZHANG SJ, SUN P, *et al.* Research on walnut variety identification method based on X-ray image [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(11): 284–288.
- [31] 陈图强, 徐贵青, 陈家祯, 等. 不同灌水量对核桃树生理、生长和果实品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 2023: 1–14.  
CHEN TQ, XU GQ, CHEN JZ, *et al.* Effects of different irrigation amounts on physiology, growth and fruit quality of walnut trees [J]. *Chin J Ecol*, 2023, 2023: 1–14.
- [32] 张婷婷. 不同施肥处理对核桃生长、产量和坚果品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
ZHANG TT. Effects of different fertilization treatments on walnut growth, yield and nut quality [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2016.
- [33] 常君, 张潇丹, 姚小华, 等. 不同品种薄壳山核桃氨基酸组成及营养价值评价[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(4): 44–52.  
CHANG J, ZHANG XD, YAO XH, *et al.* Amino acid composition and nutritional value evaluation of different cultivars of thin-shelled pecan [J]. *J Southwest Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 43(4): 44–52.
- [34] YI JH, SUN YF, ZHU ZB, *et al.* Near-infrared reflectance spectroscopy for the prediction of chemical composition in walnut kernel [J]. *Int J Food Prop*, 2017, 20(7): 1633–1642.
- [35] PENG D, LIU YL, YANG JS, *et al.* Nondestructive detection of moisture content in walnut kernel by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy [J]. *J Spectrosc*, 2021, 2021: 1–9.
- [36] 马文强, 张漫, 李忠新, 等. 基于近红外光谱的核桃仁蛋白质含量检测分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(S): 407–411.  
MA WQ, ZHANG M, LI ZX, *et al.* Protein content detection and analysis of walnut kernel based on near-infrared spectroscopy [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2017, 48(S): 407–411.
- [37] 马文强, 张漫, 李源, 等. 核桃仁脂肪含量的近红外光谱无损检测[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(S1): 374–379.  
MA WQ, ZHANG M, LI Y, *et al.* Nondestructive testing of near-infrared



- spectroscopy of fat content in walnut kernels [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2019, 50(S1): 374–379.
- [38] 马文强, 张漫, 李源, 等. 基于高光谱成像的核桃仁品质检测与分类方法[J]. *分析化学*, 2020, 48(12): 1737–1746.  
MA WQ, ZHANG M, LI Y, *et al.* Quality detection and classification method of walnut kernel based on hyperspectral imaging [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2020, 48(12): 1737–1746.
- [39] 金作徽, 翟志强, 张若宇, 等. 基于支持向量回归的核桃在线称重系统[J]. *食品与机械*, 2018, 34(7): 90–92, 126.  
JIN ZH, ZHAI ZQ, ZHANG RY, *et al.* Walnut online weighing system based on support vector regression [J]. *Food Mach*, 2018, 34(7): 90–92, 126.
- [40] 于大国, 赵明, SHI Yijun, 等. 基于比重和图像的核桃内部品质无损检测与分选[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 373–378.  
YU DG, ZHAO M, SHI YJ, *et al.* Nondestructive testing and sorting of walnut internal quality based on specific gravity and image [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2021, 52(7): 373–378.
- [41] 陈才燕. 基于 CT 成像的核桃内部品质无损检测方法[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.  
CHEN CY. Nondestructive testing method of walnut internal quality based on CT imaging [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [42] 张淑娟, 高庭耀, 任锐, 等. 基于X射线成像与卷积神经网络的核桃内部品质检测[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 383–388.  
ZHANG SJ, GAO TY, REN R, *et al.* Internal quality detection of walnut based on X-ray imaging and convolutional neural network [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2022, 53(1): 383–388.
- [43] 施丽丽, 耿新杰, 冯军民. 黑核桃发生的原因及综合防控技术[J]. *果农之友*, 2022, (11): 75–77.  
SHI LL, GENG XJ, FENG JM. Causes of occurrence of black walnut and comprehensive prevention and control technology [J]. *Fruit Growers Friend*, 2022, (11): 75–77.
- [44] 刘军, 郭俊先, 史建新, 等. 基于机器视觉与支持向量机的核桃外部缺陷判别分析方法[J]. *食品科学*, 2015, 36(20): 211–217.  
LIU J, GUO JX, SHI JX, *et al.* Walnut external defect discriminant analysis method based on machine vision and support vector machine [J]. *Food Sci*, 2015, 36(20): 211–217.
- [45] 张新伟, 易克传, 刘向东, 等. 核桃外部裂纹检测方法研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2018, 15(14): 64–68, 77, 5.  
ZHANG XW, YI KC, LIU XD, *et al.* Research on external crack detection method of walnut [J]. *J Yangtze Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 15(14): 64–68, 77, 5.
- [46] 殷文俊, 张新伟, 易克传. 基于 OTSU 遗传算法的核桃表面裂纹检测[J]. *信阳农林学院学报*, 2020, 30(4): 117–120.  
YIN WJ, ZHANG XW, YI KC. Detection of cracks on walnut surface based on OTSU genetic algorithm [J]. *J Xinyang Agric For Univ*, 2020, 30(4): 117–120.
- [47] 李成吉, 张淑娟, 孙海霞, 等. 基于计算机视觉的核桃外观缺陷检测[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 247–253, 246.  
LI CJ, ZHANG SJ, SUN HX, *et al.* Walnut appearance defect detection based on computer vision [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(8): 247–253, 246.
- [48] 李成吉, 张淑娟, 任锐, 等. 基于高光谱成像技术的核桃黑斑识别研究[J]. *农产品加工*, 2020, (8): 69–71.  
LI CJ, ZHANG SJ, REN R, *et al.* Research on walnut dark spot recognition based on hyperspectral imaging technology [J]. *Farm Prod Process*, 2020, (8): 69–71.
- [49] 陈健. 核桃深加工设备及方法现状研究[J]. *南方农机*, 2023, 54(3): 46–47, 60.  
CHEN J. Research on the status quo of walnut deep processing equipment and methods [J]. *South Chin Agric Mach*, 2023, 54(3): 46–47, 60.
- [50] WANG Q, HAMEED S, XIE LJ, *et al.* Non-destructive quality control detection of endogenous contaminations in walnuts using terahertz spectroscopic imaging [J]. *J Food Meas Charact*, 2020, 14(5): 2453–2460.
- [51] 陈彩虹, 张淑娟, 孙海霞, 等. 高光谱成像技术在核桃壳仁检测中的应用[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 38: 27–32.  
CHEN CH, ZHANG SJ, SUN HX, *et al.* Application of hyperspectral imaging technology in the detection of walnut shell kernel [J]. *J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 38: 27–32.
- [52] RONG D, WANG H, XIE L, *et al.* Impurity detection of juglans using deep learning and machine vision [J]. *Comput Electron Agric*, 2020, 178: 105764.
- [53] 李文宝, 曹成茂, 张金炎, 等. 基于深度学习的山核桃破壳物料分类识别[J]. *食品与机械*, 2021, 37(9): 133–138, 185.  
LI WB, CAO CM, ZHANG JY, *et al.* Classification and identification of pecan shell breaking materials based on deep learning [J]. *Food Mach*, 2021, 37(9): 133–138, 185.
- [54] 赵腾飞, 胡国玉, 周建平, 等. 卷积神经网络算法在核桃仁分类中的研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(6): 181–189.  
ZHAO TF, HU GY, ZHOU JP, *et al.* Research on convolutional neural network algorithm in walnut kernel classification [J]. *Chin J Agric Mech*, 2022, 43(6): 181–189.
- [55] 冯喆, 李卫豪, 崔笛. 基于高光谱成像和深度学习的山核桃内源性异物检测[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(S1): 466–471.  
FENG Z, LI WH, CUI D. Endogenous foreign body detection of hickory based on hyperspectral imaging and deep learning [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2021, 52(S1): 466–471.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

## 作者简介



国潇雨, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉、图像处理。

E-mail: 874395587@qq.com



李 玮, 博士, 教授, 主要研究方向为机电一体化控制技术、智能制造技术、工业设计。

E-mail: 772074913@qq.com