

禽蛋品质无损检测及分级技术研究进展

俞 玥^{1,2}, 张守丽¹, 李占明^{2*}

(1. 湖州职业技术学院, 湖州 313000; 2. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212004)

摘 要: 禽蛋产业是世界农业产业的重要组成部分, 禽蛋产业也是我国农业的关键组成, 是关系民生和社会稳定的重要产业。目前, 禽蛋企业主要是依靠人工分选, 劳动强度大且效率低, 检测精度无法保证。因此, 禽蛋品质的快速无损检测及分级研究对产业发展具有重要意义。本文根据现有研究对禽蛋无损检测中广泛使用的声学检测、机器视觉检测、光学检测等方法的研究现状进行综述, 阐明不同的无损检测方法在实际的禽蛋挑选及分级中的适用性。其中, 声学检测主要应用于禽蛋表面的裂纹检测与分级; 机器视觉技术主要应用于禽蛋的大小、颜色等外观参数检测; 光学检测主要是用于禽蛋新鲜度等内部品质检测。本文有望为禽蛋产业智能化分级技术的发展提供一定的理论支持。

关键词: 禽蛋; 无损检测; 机器视觉; 光学特性; 新鲜度

Research progress on nondestructive testing and grading technology of egg quality

YU Yue^{1,2}, ZHANG Shou-Li¹, LI Zhan-Ming^{2*}

(1. Huzhou Vocational and Technical College, Huzhou 313000, China; 2. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212004, China)

ABSTRACT: The egg industry is an important part of the world's agricultural industry, and it is also a key component of agriculture as an important industry related to people's livelihood and social stability. Currently, poultry enterprises mainly rely on manual selection and classification, which is high labor intensity and low efficiency with low detection accuracy. Therefore, the rapid nondestructive testing and grading research of egg quality is of great significance to the development of the industry. Based on previous studies, this paper summarized the widely used nondestructive testing methods including acoustic detection, machine vision detection, and optical detection methods to clarify the applicability of different nondestructive testing methods. The acoustic detection is mainly used in eggs surface crack detection and classification. Machine vision technology is mainly used to detect the size, color, and other appearance parameters of eggs. Optical properties testing is mainly used for internal quality testing of poultry eggs such as freshness. This paper is expected to support the development of intelligent classification technology in the egg industry.

KEY WORDS: egg; nondestructive testing; machine vision; optical property; freshness

基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201840401)、湖州市公益性技术应用研究重点项目(2018GZ28)

Fund: Supported by the Foundation of Zhejiang Educational Committee (Y201840401), and Huzhou Public Welfare Technology Application Research Key Project (2018GZ28)

*通讯作者: 李占明, 讲师, 主要研究方向为农产品加工与安全。E-mail: lizhanming@just.edu.cn

*Corresponding author: LI Zhan-Ming, Lecturer, School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212004, China. E-mail: lizhanming@just.edu.cn

1 引言

禽蛋富含蛋白质、矿物质、维生素和脂肪等成分,是人类膳食中主要的营养来源之一,因此禽蛋产业是世界农业产业的重要组成部分。禽蛋产业也是我国农业的关键组成,是关系民生和社会稳定的重要产业^[1,2]。由于我国农业生产集中化水平较低,禽蛋在运输和加工过程中极易受到损坏及污染,破损造成的腐败将污染禽蛋并导致禽蛋品质下降,而禽蛋品质不仅会影响后续的生产加工,更直接关系到食用者的身体安全及健康^[3]。因此在禽蛋销售前进行品质的筛选和分级,并对不同等级的禽蛋进行对应的加工、存储和销售是禽蛋产业重要的发展趋势。目前,禽蛋企业主要是依靠人体感官法来挑选及分级,劳动强度大且效率低,检测精度无法保证一致性^[4]。因此,禽蛋品质的快速无损检测及分级研究对产业发展具有重要的意义^[5]。

禽蛋分级的依据主要是禽蛋品质指标的检测。在禽蛋销售和加工的过程中,蛋品质的检测主要是针对禽蛋的裂纹、破损、缺陷、污染、重量、大小、蛋形指数、血斑、肉斑、新鲜度等品质^[6]。现阶段最具影响力的禽蛋分级标准为美国、欧盟以及日本版的三大标准。禽蛋分级的基础为蛋品质的无损检测技术,近年来我国在蛋品质无损检测研究领域也取得了一定的发展。禽蛋品质无损检测,即在不破坏禽蛋原本状态、化学性质等情况下,获取禽蛋相关的外观及内部品质的检测方法^[7]。禽蛋无损检测的主要方法包括声学性检测、机器视觉检测、光学检测、电学特性检测、动力学检测等。本文对声学、机器视觉和光学这三类主要的检测方法进行综述,阐明其在禽蛋挑选及分级中的适用性,以期对禽蛋产业的发展提供参考。

2 声学检测技术

声学检测主要是对禽蛋进行可承受范围的敲击,并根据不同品质禽蛋所产生的声脉冲振动频谱特征对禽蛋进行识别分类。声学检测在禽蛋检测中主要是用于对禽蛋表面裂纹进行检测,表面有裂纹的禽蛋在敲击时对振动和激励的响应与完整蛋之间有显著性的区别。有研究利用压电传感器对禽蛋两端分别进行激励和接受信号,研究得出声学信号与禽蛋内部沙门氏菌含量、蛋黄破碎率以及蛋壳裂纹之间存在一定的相关性,这是首次利用声学对禽蛋品质进行检测,但仅得到一个粗略的研究结论^[8]。随后,Cho 等^[9]专门采用声脉冲响应技术对蛋壳的品质进行了检测研究,研究了影响禽蛋声学响应信号变化的主要因素,优化得出了声学响应检测蛋壳品质的参数范围。在先前研究的基础上,Cho 等^[10]又将此项技术优化开发,研发出了一套基于声脉冲响应机制的鸡蛋裂纹自动检测平台,平台采用麦克风接受鸡蛋受声学激励响应产生的声音,并对其响应的声音信号进行频

谱分析,该平台检测裂纹蛋的准确率达到 94%,误检率为 4%,在线处理一枚鸡蛋的时间仅为 200 ms。

近年来国内的声学检测研究也有了较大的进展,其中以华中农业大学、江苏大学、浙江大学等所取得的成果较为突出。华中农业大学是国内最早进行鸡蛋裂纹自动检测系统的研究机构,近年来取得了大量的研究成果。文友先等^[11]采用模糊聚类分析方法获取禽蛋的隶属函数,并根据最大隶属度原则对测试样本中的裂纹蛋和完整蛋进行分类,得出了裂纹蛋和完整蛋的声学特性的差异,测试结果表明识别裂纹蛋的准确率为 90%,识别完整蛋的准确率为 85%。此后,华中农业大学多次进行装置、信号处理和算法的改进。王巧华等^[12]采用多层检测法对禽蛋蛋壳裂纹进行检测,利用鸡蛋激励响应所产生的声音信号的小波变换极大值作为奇异化指标,且完整蛋和裂纹蛋在此奇异化指标上有显著性差异,该检测方法将准确率提升至 96%。Deng 等^[13]采用支持向量机(support vector machine, SVM)方法对鸡蛋的激励响应声音信号进行处理判别完整蛋和裂纹蛋,将准确率提高至 98.77%,误检率低至 1.87%。随后,他们又在 SVM 方法的基础上提出了一种基于小波变换的信号时域处理方法,将判别准确率提升至 98.9%,误检率降低至 0.8%。

江苏大学和浙江大学起步较晚,但近年来有了较大的进步。江苏大学孙力等^[14,15]设计了集合红外探测的声学禽蛋裂纹检测系统,系统利用红外设备来感应禽蛋位置,对禽蛋的激励响应声音信号采用数字信号处理器进行处理和控制,在线检测速度达到了 5 个/s,检测准确率达到了 96.25%。此后,郎涛等^[16]在设计新型禽蛋裂纹检测装置时采用遗传算法从激励响应声音信号的 10 个特征参数中优化出了 4 个特征参数进行建模,将判别准确率提升至 97.2%。

浙江大学的研究者近年也在鸡蛋激励响应声学信号的处理及判别算法方面取得了一定的成果。Zhao 等^[17]采用主成分分析方法和线性判别分析方法对鸡蛋的激励响应声音信号进行分析,研究表明 2 种分析方法都能很好的对完整蛋和裂纹蛋进行区分。金程^[18]采用将禽蛋在金属波纹板滚动的方式替代传统的敲击激励方式,并利用金属的声音传导性在金属波纹板底部进行激励响应声音信号采集,在上述方法的前提下,选择激励响应信号频谱的共振峰幅值作为特征向量,采用支持向量机方法进行判别,检测准确率达到了 98%。该方法将传统检测装置简化并提高禽蛋在线输送检测效率,且提高了对于禽蛋赤道附近的裂纹检测准确度。综上所述,声学检测在禽蛋裂纹检测中已相对成熟,但声学特性易受周围环境噪声干扰。

3 机器视觉检测技术

在禽蛋产业的收购和加工环节中,禽蛋外形是一个重要的评价指标,禽蛋外形品质的传统检测基本依靠人工目测法及称重法,工作强度较大且准确性较低。因此,采

用机器视觉检测技术可快速准确的进行禽蛋外形品质(新鲜度、大小、形状、表面洁净度等)的识别及筛选是产业发展的迫切需要。国内外对禽蛋外观品质的检测方法多为机器视觉检测法^[19-28]。

王巧华等^[28]采用技术视觉技术建立鸭蛋大小尺寸分级模型, 研究表明, 鸭蛋大小分级的主要因素为鸭蛋的面积尺寸, 鸭蛋重量与其成像像素面积成正比, 但与蛋壳颜色(白壳或青壳)之间无显著性相关。基于以上研究所搭建的鸭蛋自动分选平台, 能够快速准确的完成分选任务, 其检测误差为 ± 3 g, 完全满足产业生产需求。同样, 饶秀勤等^[23]也采用颜色模型(色调 H、饱和度 I、强度 S)中的色调 H 分量对鸡蛋图像进行阈值分割判断鸡蛋的大小和重量, 研究结果也将检测误差缩小至 ± 3 g。熊利荣等^[27]采集鸡蛋图像进行处理, 提取了短轴长(S)、长轴长(L)、蛋型指数(K)以及蛋像素和(A)作为特征参数来进行鸡蛋大小的表征, 并建立 S 与鸡蛋重量之间的线性回归模型, 研究结果表明鸡蛋大小与蛋短轴(S)、像素和(A)之间呈显著性线性相关($r^2=0.96$)。

机器视觉技术在对蛋形的大小进行分级时也可对禽蛋表面清洁度和新鲜度的检测分级。例如, Garciaalegre 等^[20]对鸡蛋的红绿蓝图像进行数字图像处理, 对鸡蛋的蛋壳表面缺陷和蛋壳形状进行识别并分类, 将分类处理时间优化至 100 ms, 分类准确率提高至 82%~92%之间。然而 Dehrouyeh 等^[25]则在先前研究的基础上深入研究了图像处理色彩饱和度颜色空间算法, 用于进一步对蛋壳表面的污渍与血污的检测, 但研究结果并不理想, 洁净表面被误判为血污和污渍的错误率偏高。研究表明, 蛋芯的色调(H)与蛋的新鲜度 Haugh 值线性显著性相关, 但饱和度(I)和强度(S)与新鲜度值无显著性相关。其中蛋壳的颜色对新鲜度模型的精度影响很大, 现阶段的解决方式是根据不用蛋壳颜色建立不同的新鲜度判别模型, 检测时先进行蛋壳颜色的分类判别, 再进行新鲜度的判别。

机器视觉装置也被开发应用于鸡蛋的新鲜度等指标的检测^[26]。王巧华等^[28]用计算机视觉装置和 Matlab 软件获取鸡蛋颜色参数(H、I、S), 通过实验获得鸡蛋的新鲜度指标(哈夫值), 用其作为样本数据建立反向传播神经网络模型, 得到鸡蛋新鲜度与其图像颜色参数之间的最优关系。系统先自动判别鸡蛋壳色再分类检测鸡蛋新鲜度, 经检验, 建立的反向传播神经网络具有较好的泛化功能和鲁棒性, 对褐壳蛋和白壳蛋新鲜度的正确识别率分别为 87.258%、89.029%。后来王巧华等^[28]结合鸡蛋内容物自身结构特点, 研究鸡蛋图像形态特征与新鲜度的相关关系, 用机器视觉装置获取鸡蛋图像, 通过实验检测对应鸡蛋新鲜度(哈夫值)。采取有效图像处理, 使蛋黄和气室特征显现, 选取蛋黄与整蛋面积比值、气室高度与整蛋长轴长度比值

作为形态特征参数, 建立两特征值与新鲜度的关系模型。经检验, 通过两特征模型判别鸡蛋新鲜度的正确率分别为 91%、93%。研究表明, 鸡蛋图像蛋黄面积比、气室高度比随着新鲜度的降低而逐渐增大。

综上所述, 机器视觉技术在禽蛋外观品质快速检测中的应用是较为可行的, 但是大量的研究表明, 检测结果易受禽蛋本身的蛋壳颜色以及背景环境色影响, 且生产流水线上的在线快速移动动态检测需要进一步深入研究。

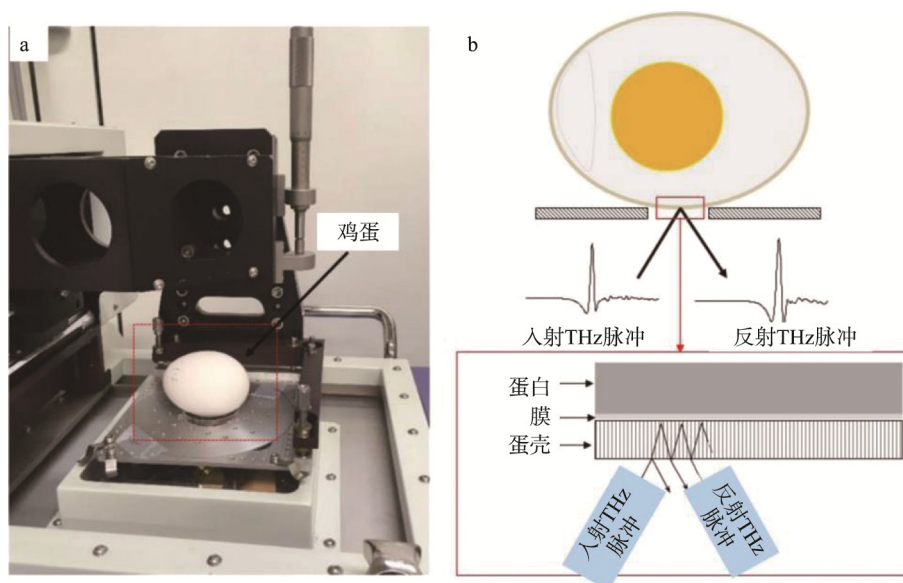
4 光学检测技术

光学检测方法主要用于禽蛋的新鲜度及蛋内品质无损检测, 根据不同品质禽蛋透射、反射和折射后光的波长、强度和光谱的光学特征参数对应不同的禽蛋内部品质指标, 建立模型来对禽蛋的品质进行判别分级。

刘燕德等^[29]得出光透射率可以快速准确地对鸡蛋新鲜度进行检测, 研究利用 200~800 nm 的可见光光谱对贮藏期间的鸡蛋进行光透射性检测, 对鸡蛋的储藏时间与新鲜度进行了相关度分析, 得出检测新鲜度可用的特征波长为 465 nm, 建立了储藏时间和透射率(相关系数 0.86)、波长 N 透射率(相关系数 0.86)的相关模型。刘燕德等^[30]又对鸡蛋的在 200~600 nm 范围的光学特性与新鲜度的相关性进行了研究, 并对鸡蛋透射性和内部品质之间进行相关度分析研究, 研究结果表明可见光区域中 400~600 nm 的光谱可用于鸡蛋新鲜度的快速检测与分级。Giunchi 等^[31]对鸡蛋新鲜度和透射性进行深入研究, 采集鸡蛋在 833~2500 nm 范围内的透射光谱并与其新鲜度指标进行对应, 结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、偏最小二乘法判别分析、偏最小二乘法回归分析 3 种方法, 建立了根据鸡蛋透射光谱信息预测新鲜度并进行分类的模型。

除此之外, 吴瑞梅等^[32]通过对不同品种的鸡蛋进行光透射特性的检测, 并建立了不同品质鸡蛋光透射率与新鲜度(哈夫值)的相关数学模型, 接着又根据以上的研究结果进行了基于鸡蛋光学特性透射率的新鲜度分级程序的编制, 分级准确率达 95%。也有报道利用太赫兹技术建立了基于线性回归的无损蛋壳厚度测量预测模型, 可以对蛋壳厚度进行估计, 其分辨率小于 10 μm , 如图 1 所示, 该方法可应用于蛋类的工业分级^[33]。

近红外光谱技术也在禽蛋内部品质检测研究中得到了较好的应用^[34-38]。Lin 等^[39]则研究利用近红外光谱法结合一类支持向量机来确定鸡蛋新鲜度, 通过结合遗传算法的人工神经网络来校准回归模型, 根据均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)和预测集中的相关系数(r)来评估模型性能, 研究发现: RMSEP=2.443 和 $r=0.879$ 时模型达到最优。



注: (a)使用 THz-TDS 进行信号采集时的实际图; (b)采用飞秒激光精确测量了皮秒脉冲完整蛋壳的太赫兹反射现象示意图。

图 1 太赫兹信号(反射太赫兹脉冲)检测完整鸡蛋^[33]

Fig.1 Detection of whole eggs using Terahertz signal (reflected Terahertz pulse)^[33]

5 结论与展望

综上所述, 禽蛋无损检测主要应用声学、机器视觉、光学特性等 3 类检测技术对禽蛋的裂纹、破损、缺陷、污染、重量、大小、蛋形指数、血斑、肉斑、新鲜度、储藏时间等品质进行检测。声学检测技术主要用于禽蛋的裂纹检测, 但声学易受外界环境中的噪声干扰^[40-42]。禽蛋的大小、重量、颜色分级等主要通过机器视觉检测技术实现, 但检测过程中易受光线、蛋壳本身颜色及厚度等因素影响^[43-46]。禽蛋的新鲜度检测主要通过光学特性技术进行检测, 但检测易受外界检测环境中的背景、光强以及鸡蛋表面洁净度影响^[47-50]。

因此, 现阶段我国的无损检测技术仍存在一些需要改进。

(1)现阶段关于禽蛋品质无损检测所针对的禽蛋品种都比较单一, 针对某一品种特性所搭建的平台和判别模型无法完全在多种品种中进行应用。

(2)虽然先阶段利用声学、光学与机器视觉技术在研究方面都已经取得一定的成果, 但因为受外界检测环境的影响较大, 因为要在线快速监测分级仍需要进一步研究改进。

(3)现阶段的检测设备基本为单一方法的应用, 很少有多种检测技术的结合应用, 在未来应该对多技术结合进行研究, 提高检测的准确性和速度。

此外, 禽蛋无损检测技术仍需要大量的开拓和探索, 现阶段的研究热点集中在对禽蛋蛋壳强度、裂纹以及新鲜

度的无损检测方法。然而对于禽蛋的双黄蛋、散黄、蛋壳表面微小裂纹等则是快速无损检测中的难点, 以上都是今后禽蛋无损检测急需解决的问题, 有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 马美湖. 我国禽蛋产业发展现状及需解决的重大科技问题[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2010, 5: 12-18.
Ma MH. China's egg industry: Status quo and issues of science and technology [J]. J Huazhong Agric Univ (Soc Sci Ed), 2010, 5: 12-18.
- [2] Pires PGDS, Pires PDDS, Cardinal KM, *et al.* Effects of rice protein coatings combined or not with propolis on shelf life of eggs [J]. Poul Sci, 2019, 98(9): 4196-4203.
- [3] Dong X, Zhang B, Dong J, *et al.* Egg freshness prediction using a comprehensive analysis based on visible near infrared spectroscopy [J]. Spectr Lett, 2020, 53(7): 512-522.
- [4] Akbarzadeh N, Mireei SA, Askari G, *et al.* Microwave spectroscopy based on the waveguide technique for the nondestructive freshness evaluation of egg [J]. Food Chem, 2019, 277: 558-565.
- [5] Campmajó G, Cayero L, Saurina J, *et al.* Classification of hen eggs by HPLC-UV fingerprinting and chemometric methods [J]. Foods, 2019, 8(8): 310.
- [6] Lorenc Z, Paško S, Kurša O, *et al.* Spectral technique for detection of changes in eggshells caused by mycoplasma synovial [J]. Poul Sci, 2019, 98(9): 3481-3487.
- [7] Liu Y, Ren X, Yu H, *et al.* Non-destructive and online egg freshness assessment from the egg shell based on Raman spectroscopy [J]. Food Control, 2020, 118: 107426.
- [8] Sinha D, Johnston R, Grace W, *et al.* Acoustic resonances in chicken eggs [J]. Biotech Pro, 1992, 8(3): 240-243.
- [9] Cho HK, Choi WK. Factors affecting acoustic responses of egg shell [J]. J

- Korean Soc Agric Mach, 1997, 22(1): 41–48.
- [10] Cho HK, Choi WK, Paek JH. Detection of surface cracks in shell eggs by acoustic impulse method [J]. *Trans ASAE*, 2000, 43(6): 1921–1926.
- [11] 文友先, 王巧华, 宗望远. 鸭蛋破损检测的试验研究[J]. *华中农业大学学报*, 2002, 21(3): 285–287.
- Wen YX, Wang QH, Zong WY. Study on detecting dilapidation of duck egg by audio signal [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2002, 21(3): 285–287.
- [12] 王巧华, 邓小炎, 文友先. 鸡蛋敲击响应的奇异性特征与蛋壳裂纹多层检测[J]. *农业机械学报*, 2008, 39: 127–131.
- Wang QH, Deng XY, Wen YX. Egg-shell crack multi-level detection based on the singularity feature of dynamic resonance [J]. *J Agric Mach*, 2008, 39: 127–131.
- [13] Deng X, Wang Q, Wu L, *et al.* Eggshell crack detection by acoustic impulse response and support vector machine [J]. *Afr J Agric Res*, 2009, 4: 40–48.
- [14] Sun L, Zhang S, Cai J, *et al.* The application of DSP in eggshell quality online detection system [J]. *Appl Mech Mater*, 2011, 43: 68–71.
- [15] 孙力, 蔡健荣, 林颖, 等. 基于声学特性的禽蛋裂纹实时在线检测系统[J]. *农业机械学报*, 2011, 42: 183–186.
- Sun L, Cai JR, Lin H, *et al.* On-line detection of cracked shell eggs based on acoustic resonance analysis [J]. *J Agric Mach*, 2011, 42: 183–186.
- [16] 郎涛, 林颖. 鸡蛋蛋壳裂纹敲击振动功率谱信号特征参数筛选和分析[J]. *农机化研究*, 2012, 7: 161–164.
- Lang T, Lin H. Detection of cracked shell eggs based on vibration signal by using variable selection and analysis [J]. *Agric Mech Res*, 2012, 7: 161–164.
- [17] Zhao Y, Wang J, Lu Q, *et al.* Pattern recognition of eggshell crack using PCA and LDA [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2010, 11: 520–525.
- [18] 金程. 鸡蛋蛋壳裂纹检测技术与装置的研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Jin C. Technology and device for inspecting crack of eggshells [D]. Hangzhou: Zhejiang Univ, 2015.
- [19] Patel VC, McClendon RW, Goodrum JW. Color computer vision and artificial neural networks for the detection of defects in poultry eggs [J]. *Artif Intell Rev*, 1998, 12(1-3): 163–176.
- [20] Garciaalegre MC, Ribeiro A, Guinea D, *et al.* Eggshell defects detection based on color processing [C]// *Machine Vision Applications in Industrial Inspection VIII*. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [21] Mertens K, De KB, Kamers B, *et al.* Dirt detection on brown eggs by means of color computer vision [J]. *Poul Sci*, 2005, 84(10): 1653–1659.
- [22] 刘友明, 文友先, 王树才. 基于机器视觉群体鸡蛋尺寸的检测方法[J]. *华中农业大学学报*, 2006, 25(4): 452–454.
- Liu YM, Wen YX, Wang SC. Research on method of detecting egg size by machine vision [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2006, 25(4): 452–454.
- [23] 饶秀勤, 岑益科, 应义斌. 基于外形几何特征的鸡蛋重量检测模型[J]. *中国家禽*, 2008, 5: 18–20.
- Rao XQ, Cen YK, Ying YB. Study on the model of egg weight detecting based on its geometry [J]. *Chin Poul*, 2008, 5: 18–20.
- [24] 冯俊青. 基于 SVM 的鸡蛋外观品质检测方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- Feng JQ. Research on inspecting methods of egg exterior quality based on SVM [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [25] Dehrouyeh MH, Omid M, Ahmadi H, *et al.* Grading and quality inspection of defected eggs using machine vision [J]. *Int J Adv Sci Technol*, 2010, 17: 23–31.
- [26] Soltani M, Omid M. Detection of poultry egg freshness by dielectric spectroscopy and machine learning techniques [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 62(2): 1034–1042.
- [27] 熊利荣, 丁幼春, 文友先. 鸡蛋新鲜度神经网络检测系统的研究[J]. *华中农业大学学报*, 2005, 24(6): 630–632.
- Xiong LY, Ding YC, Wen YX. Research on detection system of egg fresh degree based on neural network [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2005, 24(6): 630–632.
- [28] 王巧华, 文友先, 林雪冬, 等. 鸡蛋透射光图像形态特征与其新鲜度的相关关系[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 179–183.
- Wang QH, Wen YX, Lin XD, *et al.* Correlation between egg freshness and morphological characteristics of light transmission image of eggs [J]. *J Agric Eng*, 2008, 24(3): 179–183.
- [29] 刘燕德, 应义斌, 毛学东, 等. 鸡蛋新鲜度的光特性无损检测[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 152–155.
- Liu YD, Ying YB, Mao XD, *et al.* Optical nondestructive inspection of chicken-egg freshness [J]. *J Agric Eng*, 2003, 19(5): 152–155.
- [30] 刘燕德, 乔振先. 鸡蛋光特性及其新鲜度的相关性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2002, 24(1): 45–47.
- Liu YD, Qiao ZX. A correlative study on the optical properties and freshness of chicken-egg [J]. *J Jiangxi Agric Univ*, 2002, 24(1): 45–47.
- [31] Giunchi A, Berardinelli A, Ragni L, *et al.* Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy [J]. *J Food Eng*, 2008, 89(2): 142–148.
- [32] 吴瑞梅, 严霖元, 乔振先. 不同品种鸡蛋新鲜度与其光特性的相关关系[J]. *江西农业大学学报*, 2004, 26(5): 781–784.
- Wu RM, Yan LY, Qiao ZX. Correlation between freshness and optical property of different kinds of eggs [J]. *J Jiangxi Agric Univ*, 2004, 26(5): 781–784.
- [33] Khaliduzzaman A, Konagaya K, Suzuki T, *et al.* A nondestructive eggshell thickness measurement technique using Terahertz waves [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 1–5.
- [34] Xiong H, Xu H, Zhou W, *et al.* Detection of intact egg eggshell quality based on NIR spectra [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2013, 29(1): 264–269.
- [35] Lin H, Zhao J, Sun L, *et al.* Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Innov Food Sci Emerg Tech*, 2011, 12(2): 182–186.
- [36] Kuroki S, Kanoo T, Itoh H, *et al.* Nondestructive VIS/NIR spectroscopy estimation of intravitelline vitamin E and cholesterol concentration in hen shell eggs [J]. *J Food Meas Character*, 2020, 20: 1–9.
- [37] Puertas G, Vázquez M. UV-VIS-NIR spectroscopy and artificial neural networks for the cholesterol quantification in egg yolk [J]. *J Food Comp Anal*, 2020, 86: 103350.
- [38] Soltani M, Omid M. Detection of poultry egg freshness by dielectric spectroscopy and machine learning techniques [J]. *LWT-Food Sci Tech*, 2015, 62(2): 1034–1042.
- [39] Lin H, Zhao J, Sun L, *et al.* Freshness measurement of eggs using near infrared (NIR) spectroscopy and multivariate data analysis [J]. *Innov Food Sci Em Technol*, 2011, 12(2): 182–186.
- [40] Pan LQ, Zhan G, Tu K, *et al.* Eggshell crack detection based on computer

- vision and acoustic response by means of back-propagation artificial neural network [J]. *Euro Food Res Tech*, 2011, 233(3): 457.
- [41] Sun L, Feng S, Chen C, *et al.* Identification of eggshell crack for hen egg and duck egg using correlation analysis based on acoustic resonance method [J]. *J Food Proc Eng*, 2020, e13430.
- [42] Sun K, Zhang W, Pan L, *et al.* Recognition of a cracked hen egg image using a sequenced wave signal extraction and identification algorithm [J]. *Food Anal Method*, 2018, 11(4): 1223–1233.
- [43] Hashemzadeh M, Farajzadeh N. A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry [J]. *Int J Comput Intellig System*, 2016, 9(5): 850–862.
- [44] Vasileva AV, Gorbunova EV, Vasilev AS, *et al.* Assessing exterior egg quality indicators using machine vision [J]. *Brit Poul Sci*, 2018, 59(6): 636–645.
- [45] Lorenc Z, Paško S, Kurska O, *et al.* Spectral technique for detection of changes in eggshells caused by mycoplasma synoviae [J]. *Poul Sci*, 2019, 98(9): 3481–3487.
- [46] Li J, Zhu S, Jiang S, *et al.* Prediction of egg storage time and yolk index based on electronic nose combined with chemometric methods [J]. *LWT-Food Sci Tech*, 2017, 82: 369–376.
- [47] Minz P, Singh C, Sawhney I. Machine vision technology in food processing industry: principles and applications—A review [J]. *Eng Inte Agric Proc*, 2017, 95(5): 1–29.
- [48] Okinda C, Sun Y, Nyalala I, *et al.* Egg volume estimation based on image processing and computer vision [J]. *J Food Eng*, 2020, 2: 110041.
- [49] De KB, De BJ, Brunnenkreef JEJ. Method and apparatus for detecting cracks in eggshells, America: US 14/412,616 [P]. 2013-07-05.
- [50] Yang J, Qie R, Li T, *et al.* Nondestructive detection method of egg quality based on multi-sensor information fusion technology [J]. *J Comp Theo Nanosci*, 2016, 13(9): 5932–5937.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介

俞 玥, 博士, 讲师, 主要研究方向为农业智能化装备技术。
E-mail: yuyueoffice2012@126.com

李占明, 博士, 讲师, 主要研究方向为农产品加工与安全。
E-mail: lizhanming@just.edu.cn