

基于撞击声的开心果分拣模型研究

Pistachio sorting model research using impact acoustics

臧富瑶 冯涛 王晶 胡俊杰

ZANG Fu-yao FENG Tao WANG Jing HU Jun-jie

(北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048)

(School of Material and Mechanical Engineering, Beijing 100048, China)

摘要:基于碰撞声的开心果分拣技术主要通过撞击迫使坚果壳体振动发声,再经分析处理获得开闭口对应的声信号特征,最后实现不同坚果类型的识别和分离。将开心果抽象成不同开口状态的嵌套小球模型,对开心果从落地瞬间到最后自由振动衰减的整个过程进行模型分析,根据开口程度的不同表现出不同振动特性的原因,合理解释开心果的时域频域特性。提出一种根据开心果时域信号的综合对数衰减率进行分拣的方法,分拣准确率 100%。

关键词:开心果;分拣;碰撞声;时域;频域;综合对数衰减率

Abstract: Pistachio sorting technique research using impact acoustics is a method, which is to make pistachio vibrating and sounding when impacted, and get the connection between its signal features and structure characteristics through acoustics analyzing. Pistachio is considered as a nested ball, and analyses the whole process from the ground until the last moment of free vibration attenuation, and explains that the time domain and frequency domain characteristics of pistachio will perform different vibration characteristics based on the levels of opening. A new selecting method based on time-domain signal integrated logarithmic decrement is presented, and sorting effect is obvious.

Keywords: pistachio; sorting; impact acoustics; time domain; frequency domain; integrated logarithmic decrement

开心果是一种外壳坚硬的休闲食品。为了保护果仁和方便运输,该种坚果在采摘时多为闭口状态,采摘后需经一系列的处理使其出现“人工裂口”再出售,商业上通常要求开心果的开口比率在 90%~95%。

开心果开口果壳的挑选经历了由人工到纯机械的转变,但这些方法效率低、成本高、挑选精度不高^[1]。所以,使得开

心果的精确、高效分拣成为难题。

后来由于无损检测方法的发展,大量的无损检测手段已得到应用^[2],其中,声学特性检测法是目前为止发展最成熟、效益最好的农产品分拣手段,该方法分拣速度快、操作简单、不损坏产品,很适合坚果类的分拣。Pearson^[3]将碰撞声检测法用于开心果的分拣,从时域和频域图中提取碰撞声信号的分类特征。该分拣装置在试验状态下的吞吐量约为 40 颗/s(约 216 kg/h),分类准确率接近 97%。Cetin 等^[4]将主成分分析法用于特征提取,将开口开心果的识别率提高到 98.6%,未开口开心果的识别率为 99.3%。Onaran 等^[5]对榛子的饱满与空壳两种状态进行了分类识别。Khalifa 等^[6]将主成分分析和自适应神经模糊推理系统结合起来应用于空壳核桃的智能分拣,分类准确率达到 100%。Khalesi 等^[7]提取胡桃碰撞声信号的幅值、功率谱密度值等特征,采用多层反馈神经网络分类识别 2 类胡桃,最高正确识别率达到 99.64%。

与此同时,中国学者也对碰撞声分拣技术进行了大量研究:杨红卫^[8]提出利用自由落体冲击法检测小麦品质,其识别率为 100%;杨丽等^[9]采用小波包分析方法对小麦碰撞声信号进行了细致的分析;张丽娜^[10]采用 HHT 方法对小麦碰撞声信号进行特征提取,然后利用 BP 神经网络对其进行了分类,为碰撞声信号的特征提取提供了一种新方法。

据资料^[11]显示,很多发达国家的碰撞声检测技术已进入应用阶段,在中国,碰撞声检测技术还处于探索研究阶段,因此,迫切需要加快实用化研究将其转化成实际生产力。从国内外已有的研究成果看,坚果分类均以声信号处理技术为基础,结合各类数学黑箱分拣模型来实现。虽然取得了一些应用成果,但由于未对试验对象的碰撞发声机理进行研究,使得该项技术缺乏必要的理论基础,并且自引入至今,难有技术上的突破,难以对同特征坚果进行分拣预测,特征移植难度大。另外,由于信号处理过程未充分考虑碰撞发声机

基金项目:北京工商大学研究生科研学术创新基金项目(编号:20140702)

作者简介:臧富瑶(1990—),男,北京工商大学在读硕士研究生。

E-mail: xiaomachangben@sina.com

通讯作者:冯涛

收稿日期:2014-12-20

理,使得试验中的某些分拣特性表现不明显或不可靠,至今,分拣特征的选取均需依靠经验反复尝试。由于缺乏明确的理论,使得特征选取费时费力,最终还不能保证坚果的分拣效率和效果。本试验拟将以开心果为研究对象,提出一种开心果物理模型,对应解释开心果自撞击地面瞬间至最终衰减完毕过程中的现象,为今后进行仿真预测提供帮助。

1 碰撞声检测技术的原理

声波是振动的物体向外辐射能量的一种重要形式,包含着振动源的一些重要信息,从表现出的主要特性来看,振动物体辐射出来的声波与其自身振动形式有相当大的关联性,在某种程度上可以相互替代。物体的自由振动特性是物体本身特性的一种反映,因此可以通过声波信息推测出振动物体的某些物理特性。两种测量手段可在工程实际中视具体情况便宜选取。

物体的自由振动是指振动物体由外界激励源一次激励,且在不受外界干扰的情况下表现出来的振动形式。本试验中的撞击是指被测物体以一定的高度下落,然后反弹的过程。在触地瞬间,相当于受到一次锤击激励,反弹到空中后相当于自由振动,所以激励信号表现为宽频状态,能够激发出被测物体的结构振动特性。一般认为,物体的自由振动是其固有特性的一种表现形式,可以通过测量振动物体的振动特性进而推测出该物体的基本性态。

由于撞击类试验的试验物体不易附着振动传感器,或难以消除振动传感器质量对试验物体的影响,所以,若需测得该类物体的固有特性,可用声学检测的手段测量,方便,精度高。

频域分析法是将时域信息通过傅里叶变换得到信息频域特性的方法。离散傅里叶变换见式(1):

C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i e^{-j(2\pi/N)ki} \tag{1}

式中:
f_i ——待求有限长序列;
C_k ——目标离散傅里叶变换序列;
N ——待求序列的点数;
k ——自 0 到 N-1 的整数。

自由振动的衰减是物体结构特性的综合表现形式。
在单自由度系统中,决定自由振动衰减的主要因素之一是系统阻尼比。实际中常用对数衰减率来表示:

\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{2}

式中:
δ ——单自由度系统的对数衰减率;
x_1 ——时刻点 1 系统对应的振动峰值;
x_2 ——时刻点 2 系统对应的振动峰值;
ζ ——单自由度系统的阻尼比。

开心果作为一种多自由度连续体,由于结构复杂等

特点,使得撞击表现出来的振动特性无法完全一致,即振动在特定时刻的峰谷值可能有些差异,所以,无法直接将上述单自由度系统对数衰减率引入。为了能够正确评价开心果的系统综合阻尼,本试验引入综合对数衰减率:

\delta_1 = \ln \frac{\frac{1}{t_1 - t_0} \times \sum_{t_0}^{t_1} (x_{1i} - \bar{x})^2}{\frac{1}{t_3 - t_2} \sum_{t_2}^{t_3} (x_{2j} - \bar{x})^2} = \frac{2\pi\zeta_1}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} \tag{3}

式中:
t_0、t_1、t_2、t_3 ——撞击声信号中依次选取的 4 个时刻点;
δ_1 ——开心果的系统综合对数衰减率;
x ——自撞击时刻起,至衰减完毕止的时段内振动幅值的平均值;

x_{1i} ——t_0 到 t_1 时间段,各时刻点的峰值;
x_{2j} ——t_2 到 t_3 时间段,各时刻点的峰值;
ζ_1 ——开心果的系统综合阻尼;

其实质表示 t_0、t_1 时间段,t_2、t_3 时间段内系统振动位移的方差之比;作为消除多自由度系统复杂的微观离散性的一种评价系统综合阻尼比的方法,可以从一定时间的统计规律来分析系统的假设阻尼,这种方法更可靠。

2 试验系统的建立

为了使测量精准、可靠,本次试验采用全套的 B & K 公司的声学采集设备;包括 B & K 3560B 前端作为数据采集器,B & K 4189 传声器拾取开心果撞击声,装有 B & K PULSE 以及数据后处理软件 Reflex 的电脑,和 B&K 数据采集专用的网线及 BNC 线。如此,可有效降低本试验数据采集过程中采集系统的系统误差。

试验场所背景噪声为 50 dB 的实验室,试验中的撞击声信号大约为 74 dB,两者相差 24 dB,完全满足信噪比的要求。试验被撞击物选择几乎不振的大理石地面,其质量和刚度可认为无穷大,可避免因其自身振动干扰测试。

因此综合考虑,建立试验测量系统。试验对象见图 1,测量系统见图 2。

3 试验过程及数据分析

试验时需将各状态开心果依次编号,每个开心果的撞击声信号需采集 2 次,以提高撞击声信号的可信度。试验时,



图 1 开心果闭口、开口实物状态图
Figure 1 Physical state picture of pistachio with closed and opening

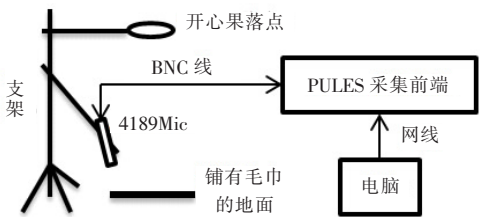


图 2 开心果碰撞声试验系统图

Figure 2 Experimental system of pistachio with impact acoustics

撞击点周围要铺设毛巾,以防止二次撞击带来的不确定性影响。撞击时,应保持周围环境的安静,以免人为提高实验室背景噪声。撞击点至麦克风传感器之间的球形空间内应无其他物体,以免出现声波散射,影响测试精度。处理后,得到的 2 种状态开心果撞击出的声信号特征时域和频域结果见图 3、4。

从图 3 和图 4 中闭口/开口开心果的时域和频域结果对比中,可以发现撞击声信号随着开心果开口的逐渐增大,呈现出以下特性:

(1) 时域趋势上:① 总体趋势,开心果撞击声信号趋于

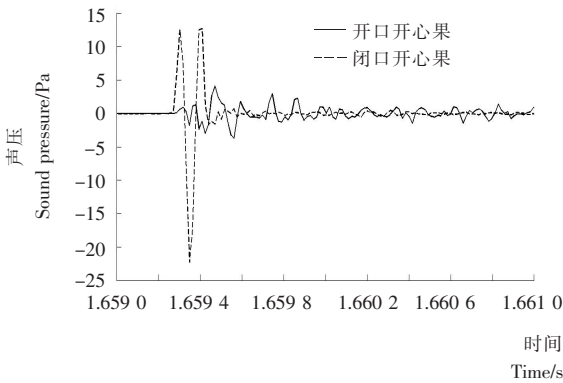


图 3 闭口/开口开心果的时域对比图

Figure 3 Time domain comparison of closed pistachio with opening

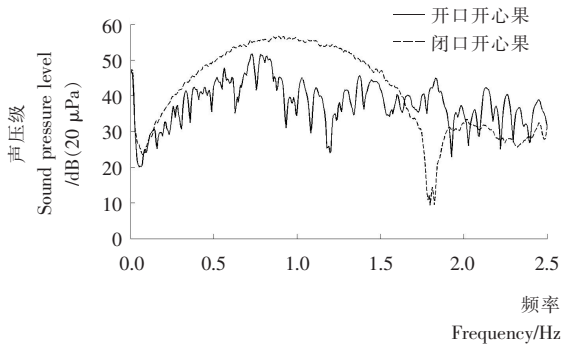


图 4 闭口/开口开心果的频域对比图

Figure 4 Frequency domain comparison of closed pistachio with opening

复杂和无规律化;② 信号的衰减时间逐渐变长;③ 信号的最大振幅逐渐降低。

(2) 频域趋势上:① 总体趋势,开心果撞击声信号趋于复杂化,图形无规则化;② 信号的波动性逐渐增强;③ 信号的峰值逐渐增多;④ 信号的峰值逐渐前移;⑤ 信号在各频段的能量趋于平均化。

现将闭口开心果抽象成一个封闭的嵌套小球,外壳为规则的椭圆刚性球,果仁为有毛刺的椭圆橡胶球。模型主要特征参数为 k, c, m , 本模型中假设样本的 m 为恒定值。

闭口开心果的壳体完整,无自由边界,果仁与外壳轮廓大小接近,所以,撞击时两者相对运动不明显。闭口开心果的完整壳体刚性很大,果仁又为软弹性体,撞击过程中出现的果仁与完整壳体之间的冲击不足以使壳体振动,所以,闭口开心果内部果仁的影响可以忽略,其特性表现为密度不均匀的刚性小球整体的撞击声特性。即,闭口开心果被当作一个密度不均匀的实心整体,忽略其内部结构,因此,其撞击声特性在时域和频域上均表现出简单性以及不同样本之间趋势上的重复性。

闭口开心果撞击地面后的反弹瞬间,其整体相当于受到了一个宽频的锤击激励。闭口开心果壳体刚性大,冲击后产生的变形位移相对较小,所以,很快出现了时域信号上的最大振动峰值,这也是闭口开心果撞击声的主要来源时段。与此同时,根据结构特性可推测出刚性较大的完整壳体在受到冲击压缩时,变形回复力很大,回复速度快,撞击作用时间短,根据动能定理可得如下结论:

$$mv = ft \tag{4}$$

下落高度相同,且假设开心果样本质量相等,在忽略空气阻力的情况下,因自由落体产生的开心果动量大小相同。撞击时,由于作用时间短,地面给开心果的反弹作用力就大,具体表现为闭口开心果的反弹高度高。就开心果壳体而言,由于其自身回复力较大,回复速度快,所以,在向外辐射声波时的辐射能量就很大,具体表现为声压峰值很大。

完成撞击后,开心果进入空中,开始自由振动状态,完整壳体通过自身振动继续向外辐射声波。由于完整壳体刚性大,振动阈值也比较高,并且,由于向外辐射能量的效率高使得壳体振动迅速降到阈值以下,完成衰减,在此过程中,回复力远大于内部阻尼,所以闭口开心果的振动衰减主要取决于刚度 k , 时域衰减形式简单,重复性好。频域上则表现为一阶模态是主振动模态,频率 8 kHz 左右。由于开心果是大阻尼连续体,因此,其模态峰值缓变而平滑。另外还有 16, 20 kHz 处的反共振峰,以及 20 kHz 以后的二阶振动模态。总体而言,闭口开心果各样本的基本参数大体类似,所以,其时频域分析图也基本相似,这是由它们的结构唯一性决定的。

开口开心果的壳体出现裂缝,有自由边界,开口大小因

样本不同而异,所以开口开心果样本的声特性差异较大。当开口程度很小时,壳体的刚性依然很大,时域特性表现接近闭口开心果,但是,频域上的模态曲线不再平滑,出现局部峰值。当壳体开口达到一定程度后,壳体刚度迅速下降,自由边界效应更加明显,果仁与壳体之间空隙加大,撞击时的相对运动明显。由于壳体刚性小,果仁会通过撞击壳体来改变壳体向外辐射的声波特性,因此,即便是同一开口开心果样本反复撞击出的声特性也不会完全一样,只能说大体趋势相近。此时,开口开心果的果仁不可忽略,其特性表现为壳体悬支,内含果仁的弹性嵌套球的综合撞击声特性。

开口开心果撞击地面后的反弹瞬间,其整体相当于受到了一个宽频的锤击激励。开口开心果壳体刚性小,冲击后产生的变形位移相对较大,所以,在进行一段时间的小幅震动后才出现时域信号上的最大振动峰值。与此同时,根据结构特性可推测出刚性较小的开口壳体在受到冲击压缩时,变形回复力很小,回复速度慢,撞击作用时间长,根据动能定理可得如下结论:

下落高度相同,且假设开心果样本质量相等,在忽略空气阻力的情况下,因自由落体产生的开心果动量大小相同。撞击时,由于作用时间长,地面给开口开心果的反弹作用力相对较小,具体表现为闭口开心果的反弹高度低。就开口开心果壳体而言,由于其自身回复力较小,回复速度慢,所以,在向外辐射声波时的辐射能量就不大,具体表现为声压峰值很大。

完成撞击后,开口开心果进入空中,开始自由振动状态,开口壳体通过自身振动继续向外辐射声波。由于开口壳体刚性小,振动阈值小,而且,向外辐射能量的效率不高使得壳体振动出现缓慢衰减的现象。在此过程中,回复力与内部阻尼属于同一量级,所以开口开心果的振动衰减主要取决于刚度 k ,以及自身阻尼 c 。由于果仁在振动过程中会反复撞击开口开心果壳体,使得时域衰减形式趋于复杂,重复性变差,衰减时间明显变长。频域上凸显出了开口开心果的非整体性,一阶模态能量下降,模态峰变多且密。总体而言,开口开心果各样本的基本参数组合结果多样,所以,其时域、频域分析图只能表现出其整体的统计特性,这是由它们的结构的复杂性决定的。

分拣算法简述:利用式(3)来算,可以从 40 个样本的综合对数衰减率中得到,综合对数衰减率小于 1 的,可以判定为开口开心果(即开口到一定的程度的开心果);大于 3 的,可以判定为闭口开心果。随后,又选取了 40 个试验样本(20 个纯闭口,20 个全开口,暂不考虑微裂口的状态)进行分拣验证,分拣准确率为 100%。

4 结论

本试验所引入的开心果模型能够很好的与试验现象相

贴合,通过分析模型的刚性、阻尼、果壳回复力等因素,能在一定程度上解释开心果的撞击声信号特性上的差异,为以后的开心果仿真模型建立打下基础。

本试验提出的开心果的综合对数衰减率公式是为了适应连续体多自由度的复杂性而提出来的评价模型综合阻尼比的一种指标,与模型的本质物理属性关联性较大,与以往的统计特征分拣方法相比,目的性更强,具有一定的理论基础作依据,增强了分拣特征的可移植性。

参考文献

- 1 Pearson T C, Cetin A E, Tewfik A H, et al. An overview of signal processing for food inspection [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007(5):106~108.
- 2 应义斌,韩东海.农产品无损检测技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- 3 Pearson T C. Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(2):249~253.
- 4 Cetin A E, Pearson T C, Tewfik A H. Classification of closed and open-shell pistachio nuts using voice-recognition technology [J]. Transaction of ASAE, 2004,47(2): 659~664.
- 5 Onaran I, Pearson T C, Yardimci Y, et al. Detection of underdeveloped hazelnuts from fully developed nuts by impact acoustics [J]. Information & Electrical Technologies Division of ASABE, 2006, 49(6): 1 971~1 976.
- 6 Khalifa S, Komarizadeh M H, Tousi B. An intelligent system for grading walnuts based on acoustic emission and neural [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2011, 9(1): 132~135.
- 7 Khalesi S, Mahmoudi A, Hosainpour A, et al. Detection of walnut varieties using impact acoustics and artificial neural networks (ANNs)[J]. Modern Applied Science, 2012, 6(1):43~49.
- 8 杨红卫.小麦品质分析的信号处理方法研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2005.
- 9 杨丽.基于信号处理的小麦品质声学检测方法研究[D].郑州:河南工业大学,2007.
- 10 张丽娜.基于 BP 神经网络的小麦碰撞声信号分类[J].电子设计工程,2013,21(7):163~168.
- 11 梅亚敏,郭敏.基于碰撞声信号的农产品品级检测技术综述[J].西北农林科技大学学报,2013,41(4):213~219.