

基于振动频谱子带质心的西瓜内部品质检测

浦宏杰^{1,2} 汪迪松¹ 李臻峰^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214100)

摘要: 使用子带频谱质心作为特征参数, 描述西瓜内部品质中的糖度及瓢色。通过分析表明, 子带频谱质心对冲击振动法中冲击方式及冲击位置的依赖性较小, 用其进行检测可大大简化系统的复杂度。针对某特定品种西瓜获取了用于描述糖度及瓢色中的红-绿分量的最优子带位置, 该子带谱质心与糖度及色差 a^* 值之间线性模型的决定系数分别达到 0.812 4 和 0.733 6, 远优于使用共振峰频率作为特征参数的模型, 但子带谱质心对瓢色中的 L^* 及 b^* 值解释能力欠佳。

关键词: 西瓜; 内部品质; 糖度; 成熟度; 频谱质心; 无损检测

中图分类号: S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0281-08

Nondestructive Testing for Internal Quality of Watermelon Based on Sub-band Spectrum Centroid of Impact Vibration

PU Hongjie^{1,2} WANG Disong¹ LI Zhenfeng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214100, China)

Abstract: For the purpose of testing the watermelon's interior quality nondestructively, the sub-band spectrum centroid of the impact vibration response was employed as the characteristic parameter to describe and model the soluble solid content (SSC) and the flesh color of watermelon. A total of 76 watermelon samples were used in the experiments, for both the nondestructive vibration tests and the destructive SSC and color tests. Different impact methods and positions were attempted to validate the robustness of the sub-band spectrum centroid as a characteristic parameter. The results showed that the sub-band spectrum centroid had low dependency on different impact methods and positions, which could greatly simplify the complexity of the testing system. The optimized sub-bands were obtained for modeling the SSC and the a^* value of color with determination coefficients of 0.812 4 and 0.733 6, respectively, which were higher than that when the resonant frequencies were used as the characteristic parameter. Linear models were made for both SSC and a^* value. The vibration sub-band spectrum centroid was gone down monotonously along with the SSC (sub-band 144 ~ 416 Hz) and a^* (sub-band 148 ~ 428 Hz) value, with the slope of -1.361 and -1.019, respectively. However, the sub-band spectrum centroid had low ability of describing the L^* and b^* values in color testing, whose determination coefficients were only 0.52 and 0.148, respectively.

Key words: watermelon; internal quality; soluble solid content; maturity; sub-band spectrum centroid; nondestructive testing

引言

我国是西瓜生产大国,但目前对西瓜的分级分选通常仍由主观判定完成,效率低下,且准确性得不到保证^[1]。振动检测装置成本低廉、抗干扰能力

强、易于小型化,在对瓜果内部品质检测中具有很大的潜力^[2]。从 20 世纪 90 年代开始,相继有一系列的研究工作涉及到利用振动与声学对西瓜品质进行无损检测^[3-7]。国内也有一些相关工作,涉及到利用振动衰减、对称性、声波波形、传播速度、透射率对

收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508229)和江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014023-32)

作者简介: 浦宏杰(1980—),男,副教授,主要从事食品无损检测研究, E-mail: hongjie_pu@hotmail.com

西瓜的糖度、内部空洞等品质进行检测^[8-11]。

目前的声学及振动无损检测方法中,通常使用的特征参数有共振峰位置、共振峰高度、声传播速度、衰减系数等^[12-15]。但准确获得这类特征参数,往往需要一个相对稳定的激励源,或同时对激励信号进行采集,以获得归一化激励下的频率响应函数,并通过多次测试求平均值的方式最大可能地去除噪声干扰^[16]。基于这些前提,才可能从频谱曲线中提取稳定可靠的特征参数用以描述西瓜的物理特性或进行建模。为实现上述目的,通常的做法是使用力锤对西瓜进行结构振动激励,并且通过多次冲击求平均值的方式来降低噪声影响。但多次冲击往往对西瓜表面及内部造成损伤,所以会用软质材料冲击,这又会使特征参数难以从谱线上顺利提取。

为简化以上硬件及测试条件,本文提出一种频谱特征参数及其提取方法,通过在频率响应函谱中选择特定的子频带,并提取子带频谱质心的位置,作为描述西瓜糖度及瓢色等内部品质的特征参数,建立线性回归模型。

1 材料和方法

1.1 测试样本

本试验所用西瓜样本产于无锡市黄土塘村某温室,品种为早佳 8424。样本总数为 80 个,花期(授粉后的生长期)分布于 30 ~ 50 d 之间,采摘时尽可能保证样本的外形规则,大小一致,色泽均匀。由于实验过程中 4 个样本在多次测试中破损(花期短的样本较脆弱),未能采集到所有数据,故实际有效样本为 76 个。测试时期为 2015 年 7 月上旬,所有测试均在采后 2 d 内完成,样本保存环境为室温(25℃),相对湿度在 60% ~ 70% 之间,所有测试均在江苏省食品先进制造装备技术重点实验室完成。

1.2 测试方法

1.2.1 力锤冲击测试

图 1 为自行开发的振动测试系统,主要包括冲击力锤(美国 PCB 公司,型号 086C01)、加速度传感器(美国 PCB 公司,型号 352C68)、信号调理仪(美国 PCB 公司,型号 482C05)、数据采集卡(美国 NI 公司,型号 USB6259)、计算机及由刚性基座和软海绵构成的工作台。系统的软件部分基于 LabView 开发,融合数据采集、处理、显示、存储及建模识别。

在西瓜样本上取 8 个测点,组合 A 为加速度传感器用蜂蜡粘贴于瓜蒂部位,力锤冲击点沿经线均布标记为 A1、A2、A3、A4,如图 2 所示。组合 B 为加速度传感器置于赤道上某点,并沿赤道半圆均布冲击点,标记为 B1、B2、B3、B4。用不同材质锤头进行

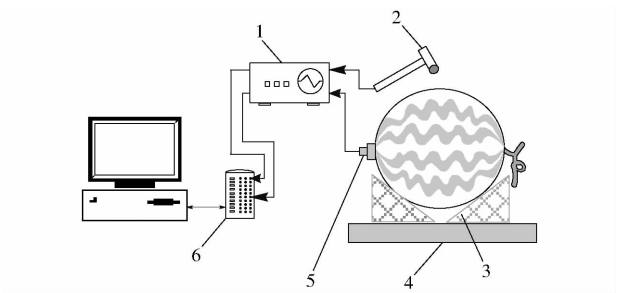


图 1 力锤冲击测试实验系统简图

Fig. 1 System schematic of impact vibration test

1. 信号调理仪 2. 冲击力锤 3. 软海绵 4. 刚性基座 5. 加速度传感器 6. 数据采集卡

测试,分析比较其对特征提取的影响,为保证在多次冲击后不至损害西瓜的表面及内部,最终实验数据均为由软橡胶锤头冲击完成。如图 3 所示为 4 种不同材料的锤头,从左至右分别为铝质、塑料、硬橡胶、软橡胶。

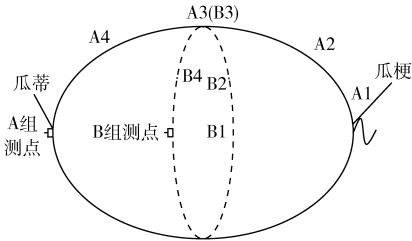


图 2 冲击-测点组合分布图

Fig. 2 Distribution map of impact - testing points combination

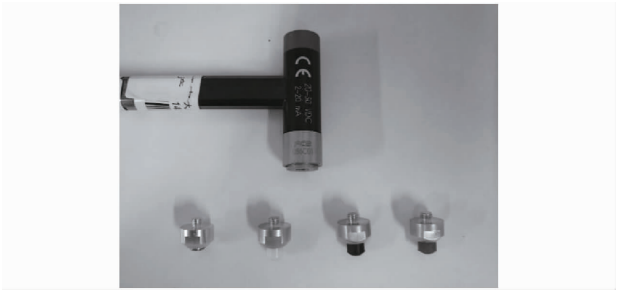


图 3 不同锤头材料示意图

Fig. 3 Sketch of impact hammer with different hammerheads

1.2.2 手拍击测试

利用力锤冲击获取频响函数的方法,导致系统复杂,不利于便携,故本研究同时利用便携采集卡及微型传感器开发了便携测试系统,如图 4 所示。系统由便携式采集卡(美国 NI 公司,型号 USB9234)、微型加速度传感器(美国 PCB 公司,型号 352A21)、便携式计算机构成。系统软件基于 LabView 开发,基本功能同上,由于采用手拍击的方式激振,采集部分更改为时域信号阈值触发采集,后置快速傅里叶变换及信号降噪,平滑处理,获得冲击响应函数,其余存储、显示、建模识别等功能不变。手拍击测试方法仅用于测试部分样本,以验证谱质心方法结合手拍击测试对力锤冲击方法的替代能力,并不针对所

有样本进行测试。

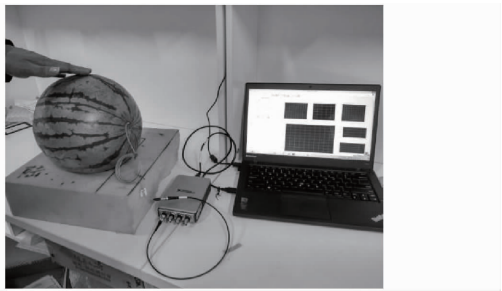


图 4 便携测试系统及手拍击测试实验

Fig. 4 Hand slapping test with portable testing system

1.2.3 西瓜糖度测量

西瓜糖度(可溶性固形物含量, Soluble solids content, SSC)是描述西瓜成熟度的重要指标之一。由于西瓜瓜瓢糖度分布不均,仅中心糖度无法代表该样品糖度,因此,在振动信号采集完毕后,沿瓜梗和瓜蒂纵向切开分别采集靠近瓜梗部位、瓜蒂部位和瓜中心部位瓜瓢榨汁,采用日本爱拓 PAL-1 型数字手持折射仪分别测定该 3 处的糖度。折射仪在每次测量前均用蒸馏水洗净擦干,每个测点重复测量 3 次取平均值,每个西瓜样本的 9 次测量平均值作为西瓜整体平均糖度指标。

1.2.4 西瓜瓢色测量

西瓜瓜瓢颜色指标也是描述西瓜内部品质的重要指标之一,对同一品种,不同成熟度的西瓜瓜瓢颜色不相同,未熟西瓜瓜瓢呈粉红色;适熟西瓜瓜瓢呈鲜红色;过熟西瓜瓜瓢呈暗红色。测试使用三恩施科技有限公司的 NR10QC 型色差仪完成,将色差仪调整至 Lab 表色系统,其中: L^* 值为亮度,反映色泽的亮度; a^* 值为正值时表示红色偏向,负值时表示绿色偏色; b^* 值为正值时表示黄色,负值时表示蓝色。测量点如以上糖度测试中,同样取中心、瓜蒂、瓜梗 3 个部位附近的瓜瓢,每位置重复 3 次测量取平均值,用总平均值代表整体瓢色偏向。

1.3 分析方法

1.3.1 频谱质心特征提取

子带频谱质心(Subband spectrum centroid)是一种用于语音识别系统中进行特征提取的方法^[17-18],也会被用于超声诊断的信号处理中^[19-20],可从高背景噪声的信号中实现鲁棒特征提取。子带谱质心的提取公式为

$$C = \frac{\int_{f_c-\Delta f}^{f_c+\Delta f} fw(f)A(f)df}{\int_{f_c-\Delta f}^{f_c+\Delta f} w(f)A(f)df} \tag{1}$$

式中 C ——质心在频率轴上的位置
 f_c ——子带中心频率

Δf ——半子带宽度
 $w(f)$ ——各子带滤波器组(此处全取 0 或全取 1)
 $A(f)$ ——频率点 f 处的能量密度

考虑本研究中,主要特征信息集中于 500 Hz 以下,子带划分时,取中心频率 0 ~ 500 Hz、变化间隔 4 Hz,半子带宽度 0 ~ 250 Hz、变化间隔 4 Hz,共计 2875 个子带,对每个子带提取质心位置,作为特征用于描述西瓜的糖度和瓢色 2 项内部品质。

1.3.2 线性回归建模

试验中 76 个西瓜样本,每个样本均获得 8 个不同测试点的频率响应函数,3 个点的糖度及其平均值,3 个点的瓢色及其平均值。从所有 8×76 个频响函数中提取共 2.356×10^6 个子带谱质心特征,对 76 个糖度平均值和色差平均值做线性回归,获取模型参数、决定系数 R^2 及均方根误差。线性回归分析及建模均在 Matlab 2014a 中完成。

2 结果和讨论

2.1 锤头材质对共振峰的影响

西瓜表面为易损表面,在冲击力锤测试方式下,会遇到测试信号质量与避免表面破坏难以相容的矛盾。冲击重复次数越多,信号越平滑,受背景噪声的干扰越小,但多次冲击容易破坏西瓜表面;锤头材料越硬,在相同次数的重复冲击下,能获得的信号质量越好,但同时越硬的锤头材料越容易破坏表面。

图 5 给出铝质、塑料、硬橡胶和软橡胶 4 种不同锤头材料分别冲击单次和冲击 10 次平均获得的频率响应函数。对第 1 共振峰,图 5 中标注为点 A 的位置,在各种锤头、单次和多次冲击下均能保证比较好的信噪比和平滑度,从而保证每次相对稳定可靠的峰值及峰位置(频率点)的提取。可靠的峰值特征提取对于传统的建模方法具有非常重要的作用。

硬质材料如图 5a 中所使用的铝质锤头,西瓜表面不能在保证无损的前提下承受多次冲击,所以只能采用图中蓝线所示的单次冲击曲线,在提取较高阶次(如第 3 个)的共振峰时,由于平滑度不够,会出现分析程序提取峰位置不稳定的情况,而这种问题在软性锤头材料上更为明显,如图 5c 中的点 B 及图 5d 中的点 C。锤头材料越软,能顺利提取的峰越少,图 5c 为 2 个,而图 5d 只剩下 1 个峰可顺利提取。能提取的特征参数越少,越难建立高鲁棒性的检测模型。如采用软性材料的锤头,在多次冲击力作平均的情况下,仍可一定程度上保护西瓜表面,并获得相对平滑的频响曲线,但是多次测量比较耗时,会大幅降低测试效率。

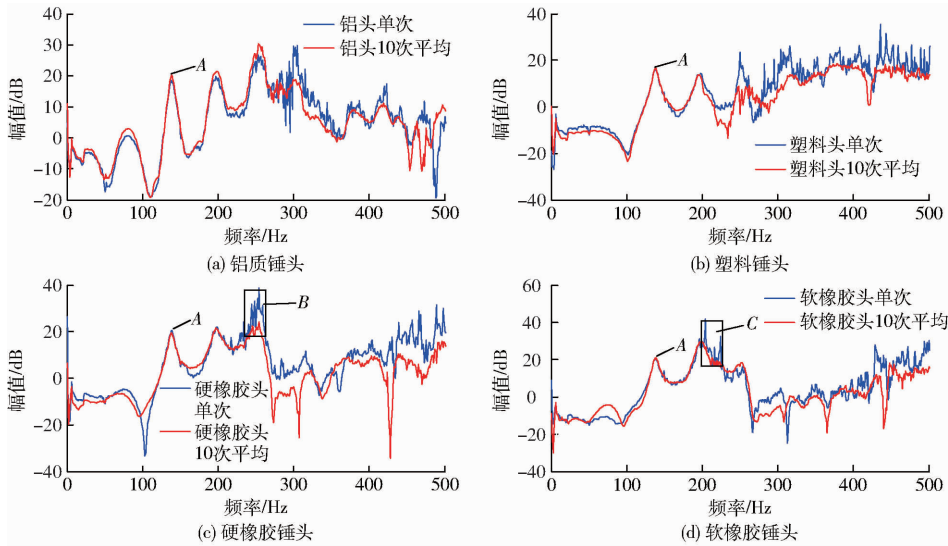


图 5 不同材质锤头及不同次数对频响应函数峰值提取的影响
Fig. 5 Influence of different hammerheads on peak extraction

2.2 频谱质心法

2.2.1 频谱质心提取

图 6 为采用不同冲击手段获取的频率响应函数,进行某特定子带谱质心提取方法的描述。为避免图线过于重叠导致混乱,并未将所有锤头对应曲线在图中给出,后续分析所采用数据均为软锤头冲击获取,对比项有手拍击方法(具体拍击位置为赤道附近)、软橡胶锤头单次冲击及软橡胶锤头 10 次冲击取平均值 3 种。图 6 中选择某特定子带 150 ~ 250 Hz (200 Hz 中心频率,100 Hz 带宽),对以上 3 组曲线提取频谱质心,并在图中标示出质心的位置。可以看出,由于冲击能量的大小有区别,质心高度差异较大,尤其是手拍击情况下,响应频谱未针对冲击力做归一化处理,如果未对冲击信号进行采集测量,利用谱质心高度作为特征参数进行检测是不可靠的;但 3 种情况下该子带内频谱质心的水平位置(即频率点)几乎相同,差异非常小。

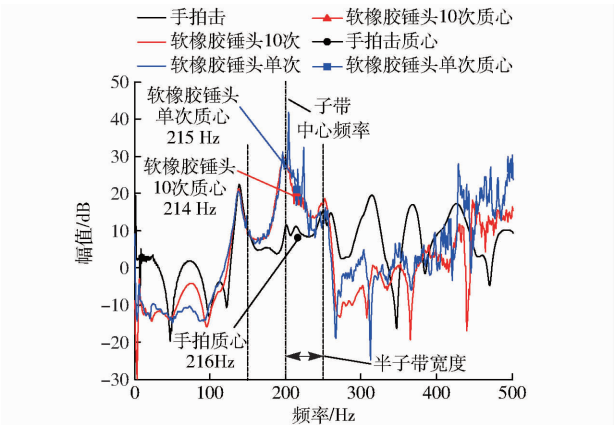


图 6 频谱质心特征参数提取及不同冲击方式的比较
Fig. 6 Extraction and comparison of sub-band spectrum centroid under different impact methods

由于在对具体品种的西瓜样本进行分析前,并不能确定各子带谱质心对于糖度及瓢色的解释能力,同时考虑到在频谱的 500 Hz 以上,受噪声干扰严重,所以本文中在 0 ~ 500 Hz 内以 4 Hz 为步长将整个频段划为 2 875 个子带,对每一组测试数据的频响应函数提取谱质心,并尝试与 76 个西瓜样本的糖度及瓢色数据建立线性回归模型。根据回归模型的决定系数 R^2 及分布来选定合适的子带。图 7 为以手拍击冲击方式获取的质心与糖度做线性回归的决定系数 R^2 在不同子带上的遍历图。其中 x 轴为子带中心频率,以 4 Hz 为步长, y 轴为半子带频宽,同样以 4 Hz 为步长, R^2 用色轴强度表示。从图中可提取出在以 280 Hz 为中心频率,半子带宽度为 142 Hz 的子带上,提取的子带谱质心与糖度具有很好的相关性,用线性模型解释的决定系数达到 0.87,在使用非线性模型情况下可能更好,由于非线性模型并无确实的理论依据,故本文中暂不做探讨。

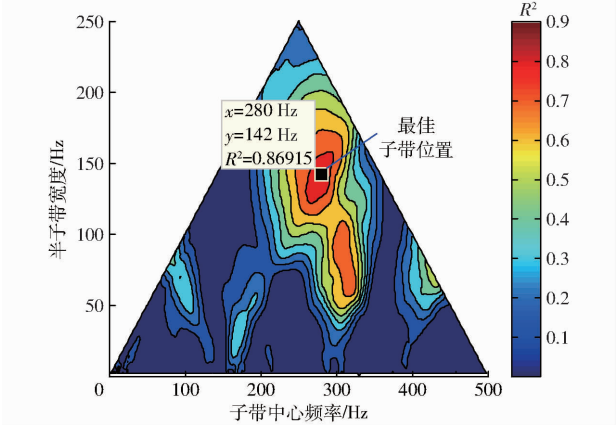


图 7 各子带谱质心与糖度相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis for different sub-band spectrum centroids and SSC

2.2.2 频谱质心方法下位置的影响

在利用冲击振动对西瓜品质做无损检测的方法中,激励点与测点的位置对传递函数的影响很大,主要体现在不同的激励点与测点位置组合对某些特定模式的抑制能力有差别,各共振峰在不同组合下高度差异明显,极大地限制了这类方法在实际分选中的应用。针对这个问题,在利用谱质心方法对西瓜内部品质建模时,有必要就激励-测点位置对方法可靠性的影响进行分析。

图 8 给出了所有 8 个测试位置组合下谱质心对西瓜糖度解释能力的遍历图。激励点和测点比较近的情况下(测点 A4 和 B4),不能很好地通过谱质心的变化来描述糖度的变化,线性模型的决

定系数 R^2 在 0.5 以下,其他位置能得到 0.8 甚至 0.9 以上的最高 R^2 值,但考虑到子带的选择需要尽量避免位置的影响,可选择在不同位置上适应性较好的子带区域,如右上角较高 R^2 值的区域。如果能保证每次测量的测点组合位置都能够相同或者相近(如能够控制冲击位置的自动分选系统),可以用其他子带区域(如测点 A2 的(300 Hz, 100 Hz),测点 B3 的(100 Hz,50 Hz)附近)或者多个具有高 R^2 的子带谱质心做多元回归,从而提高估计模型的可靠性。另外,通过对比图 7 和图 8 发现,如果利用谱质心来对糖度进行建模,手拍击方法和软橡胶锤头冲击力锤冲击 10 次取平均值的结果差异并不大。

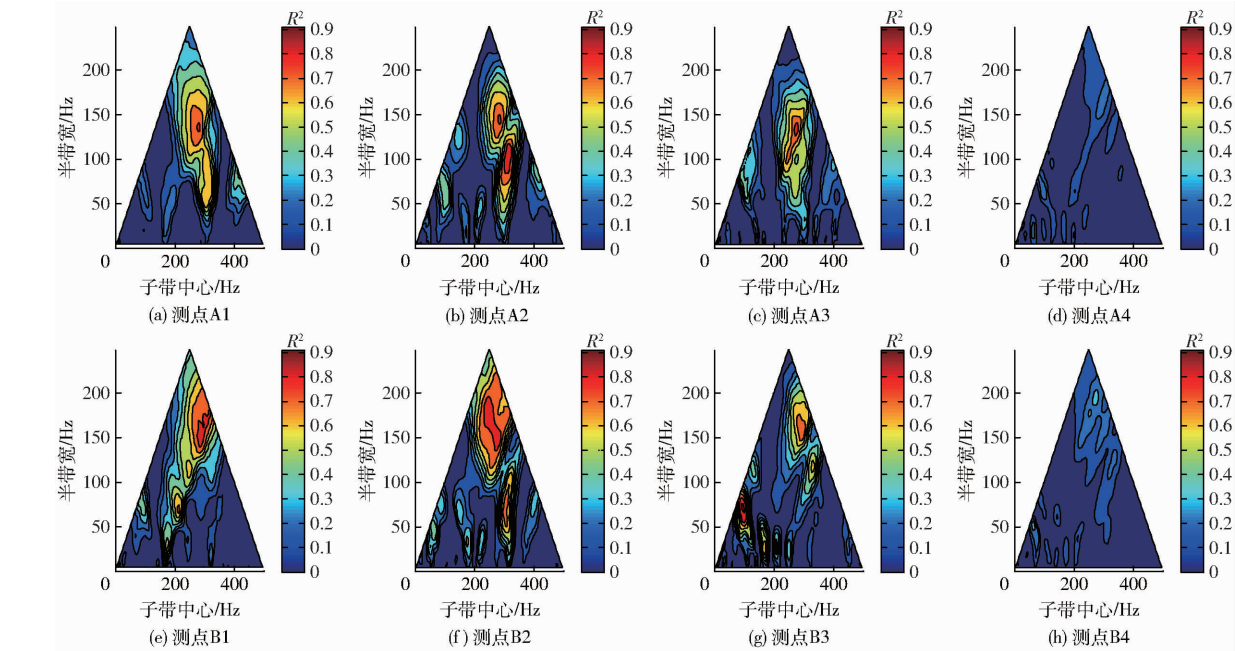


图 8 软橡胶锤头冲击 10 次取平均值,8 个不同位置组合的情况下子带质心与糖度相关性
Fig.8 Correlation of sub-band spectrum centroids and SSC in different impact positions with 10 times soft rubber hammerhead impacts average

2.3 利用谱质心建模

2.3.1 利用谱质心估计糖度

根据上述分析,在激励-测点组合 A1、A2、A3 和 B1、B2、B3 下,可选择同一子带提取谱质心,进而对谱质心位置与糖度之间的关系进行建模。激励-测点组合 A4 与 B4 并不能有效用于糖度检测,原因可能在于冲击点距离测点过近,检测到的振动信号更多体现直达传递而对于内部瓜瓤结构阻尼及弹性模量变化的反映能力相对较弱。图 9 为测点 A1 位置,软橡胶锤头冲击 10 次取平均值的频响曲线谱质心遍历图,可以提取中心频率 280 Hz,半子带宽度 136 Hz 的子带谱质心,与西瓜糖度进行线性回归,其决定系数为 0.81。相对应的子带在频响曲线上的位置如图 10 所示,子带范围内包含前 5 个共振峰

的绝大部分信息,即西瓜前 5 个共振峰上的能量分布中心位置能够较好地描述其内部糖度的数值,这表明,该 5 个共振峰所对应的特定形式与阶次的模式,其模式阻尼显著地受到西瓜成熟度的影响,而同时成熟度也与糖度有着紧密的联系。

图 11 为上述 144 ~ 416 Hz 子带的频谱质心与糖度的线性回归模型曲线,方块散点为实测 76 个西瓜样本的平均糖度与各自在测点 A1 上 144 ~ 416 Hz 子带的频谱质心位置,蓝色直线为其经过线性回归的结果,决定系数为 0.812 4。相比于课题组前期研究中利用共振峰位置来进行糖度估计的结果(图 12),以第 1 共振峰位置为例,花期在 50 d 左右的过熟瓜会让模型极大地偏离线性趋势,但即便在剔除过熟样本后第 1 共振峰 f_1 与糖度之间的线性模

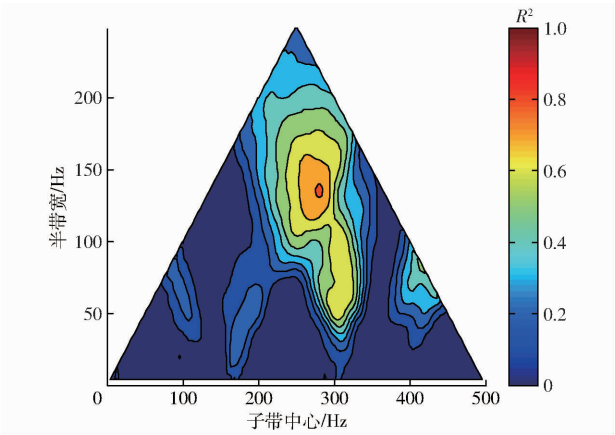


图9 糖度与谱质心关系

Fig. 9 Correlation of sub-band spectrum centroids and SSC

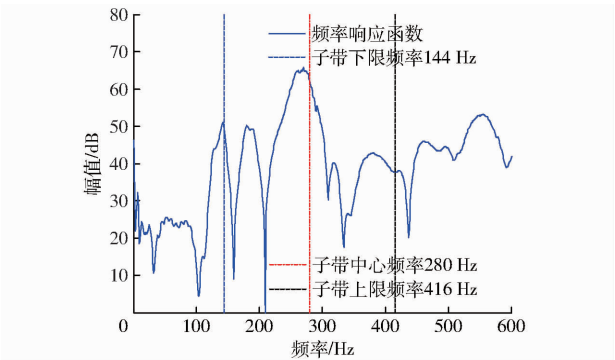


图10 子带位置示意图

Fig. 10 Position sketch of selected sub-band

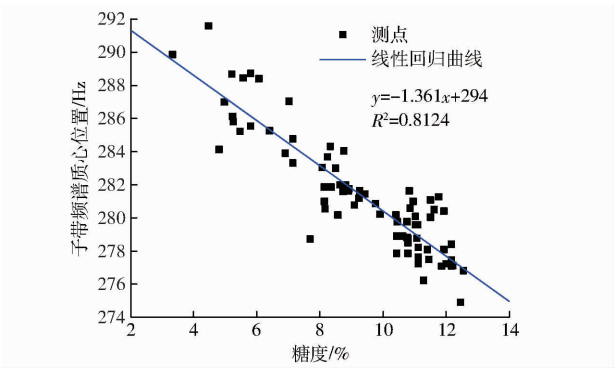


图11 糖度-谱质心线性回归模型

Fig. 11 Linear regression model for SSC and sub-band spectrum centroid

型仍只有0.7452的决定系数。可见,同一尺度下,共振峰位置主要受西瓜,尤其是瓜皮的弹性模量影响,而瓜瓤的性质(如糖度)更多影响了阻尼。故使用子带谱质心方法来估计西瓜的糖度要优于传统使用共振频率来估计糖度的方法。表1列出了使用前3个共振峰频率与使用谱质心来建模的模型及决定系数,其中 x 为糖度,可看到使用谱质心方法具有明显的优势。

2.3.2 利用谱重心估计瓢色

瓢色作为另外一个品质参数,极大地影响顾客

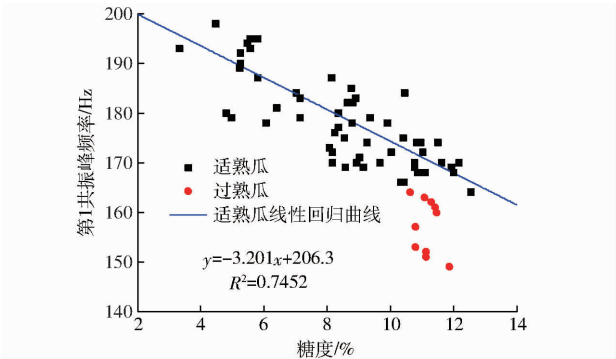


图12 第1共振峰频率与糖度的线性回归模型

Fig. 12 Linear regression model for SSC and the first resonant frequency

表1 共振频率-糖度建模与谱质心-糖度建模的比较

Tab.1 Comparison between models with resonant frequency and sub-band spectrum centroid			
特征参数	线性模型	R^2	
共振峰	f_1	$f_1 = -3.201x + 206.3$	0.7452
	f_2	$f_2 = -5.001x + 295.3$	0.6642
	f_3	$f_3 = -6.001x + 369.5$	0.5912
谱质心	f_{Ctd}	$f_{Ctd} = -1.361x + 294$	0.8124

对西瓜的主观偏好。图13为使用子带谱质心对西瓜瓢色进行估计的方法,使用了色差测量中的 a^* 值,主要用以描述红-绿色值。经过计算,解释能力最高的子带位于148~428 Hz(子带中心288 Hz、半带宽140 Hz),其线性模型的决定系数可达0.73。其规律性表现为随着子带质心位置下移动(往低频方向偏移), a^* 值逐渐增大,瓢色往红色方向偏移。这与常识中西瓜拍击声越低沉、成熟度越高、瓢色越红的规律基本吻合。本研究中,76个样本被随机分成50个作为校正集,其余26个作为验证集,以对模型的预测能力进行检验,见图14,获得的模型为 $y = -1.019x + 312$,决定系数为0.7336,校正集均方根误差为1.574,验证集均方根误差2.105,略大于校正集误差,均小于最大色差 a^* 值的10%,可见该模型能够很好地通过148~428 Hz的子带谱质心对瓢色中的红-绿分量做出预测。

同时,对于色差测量中另外2个量 L^* 和 b^* ,经过分析这2个量很难用频谱质心来描述其变化规律,在尝试线性建模中,其决定系数最大值分别为0.62(b^* 值,见图15)和0.148(L^* 值,见图16),而按照前述0.62点为不常用子带(位于164 Hz中心频率、20 Hz半宽子带),常用子带上的决定系数仅为0.52(位于280 Hz中心频率、152 Hz半宽子带)。由此可见,瓜瓤的黄-蓝色差分量与成熟度的关系并不十分明确,瓜瓤的亮度与成熟程度相关度非常低。

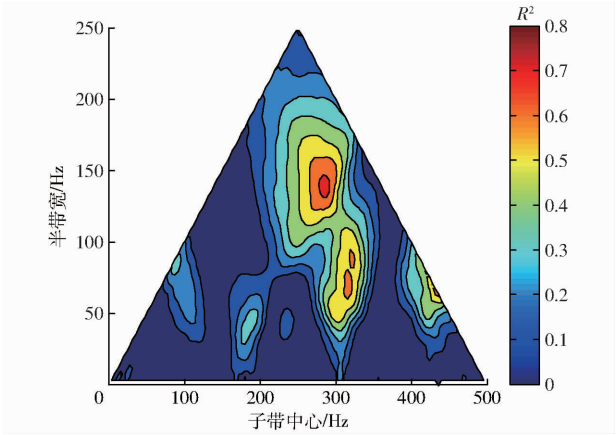


图 13 谱质心与色差 a^* 值关系
Fig. 13 Correlation of a^* and sub-band spectrum centroid

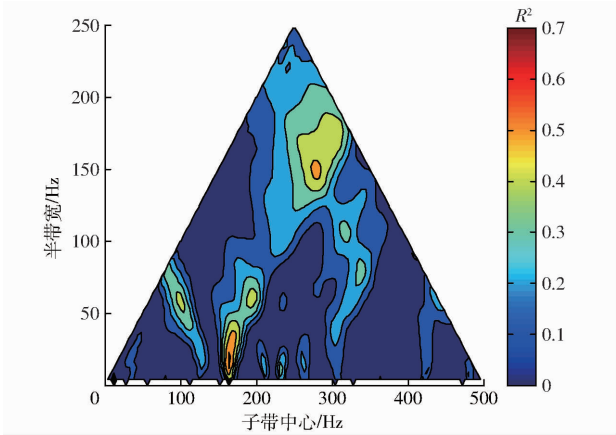


图 15 谱质心与色差 b^* 值关系
Fig. 15 Correlation of b^* and the sub-band spectrum centroid

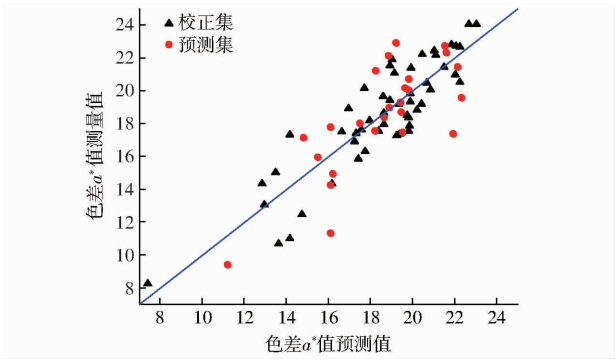


图 14 色差 a^* 值-谱质心性回归模型及其预测能力分析图
Fig. 14 Linear regression model for a^* and sub-band spectrum centroid and its prediction capability

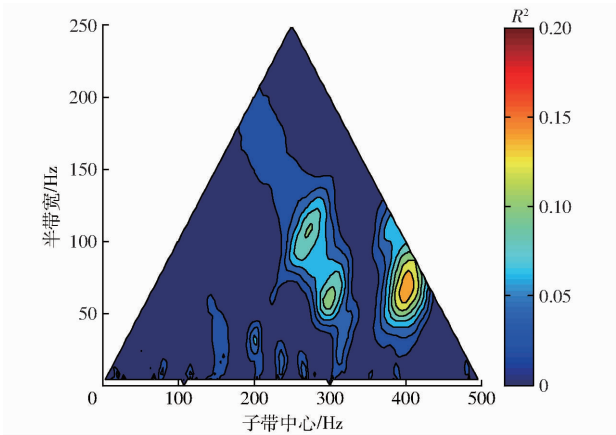


图 16 谱质心与色差 L^* 值关系
Fig. 16 Correlation of L^* and sub-band spectrum centroid

3 结束语

利用冲击振动频谱,对某特定品种西瓜的内部品质中糖度与瓢色 2 项进行估计。用子带频谱质心作为特征参数对糖度及瓢色进行建模。子带谱质心特征受冲击的方式及位置的影响较小,可很大程度

上简化测试系统的复杂度。经过研究,针对该品种西瓜,获得了最优子带范围,其上谱质心可线性描述西瓜糖度及瓢色中的红-绿分量,决定系数分别可达 0.812 4 及 0.733 6,较使用共振频率作为特征参数有很大的提高。但对于瓢色中的黄-蓝成分及瓜瓢亮度,子带谱质心并不能进行有效描述。

参 考 文 献

1 应义斌,蔡东平. 农产品声学特性及其在品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 1997, 13(3): 208 – 212.
YING Y B, CAI D P. Acoustic properties of fresh agricultural products and its application in non-destructive quality evaluation [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(3): 208 – 212. (in Chinese)

2 吕飞玲. 基于声学特性的西瓜品质无损检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
LÜ F L. Non-destructive quality evaluation of watermelon based on its acoustic property [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)

3 STONE M, AMSTRONG P, ZHANG X, et al. Watermelon maturity determination in the field using acoustic impulse impedance techniques[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(6): 2325 – 2330.

4 ARMSTRONG P, STONE M, BRUSEWITZ G. Nondestructive acoustic and compression measurements of watermelon for internal damage detection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13(5): 641 – 646.

5 NOURAIN J, YING Y, WANG J, et al. Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis [J]. Journal of Zhejiang University—Science B, 2005, 6(6): 483.

6 TANIWAKI M, TOHRO M, SAKURAI N. Measurement of ripening speed and determination of the optimum ripeness of melons by a nondestructive acoustic vibration method[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(1): 101 – 103.

- 7 ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, DELSHAD M, et al. Evaluation of watermelons texture using their vibration responses[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 102 – 105.
- 8 王书茂, 焦群英, 籍俊杰. 西瓜成熟度无损检验的冲击振动方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 241 – 245.
WANG S M, JIAO Q Y, JI J J. An impulse response method nondestructive inspection of the ripeness of watermelon[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(3): 241 – 245. (in Chinese)
- 9 刘志壮, 陈蓉, 张文昭, 等. 西瓜品质无损检测技术研究进展[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(3): 73 – 76.
LIU Z Z, CHEN R, ZHANG W Z, et al. Research progress of watermelon nondestructive examinations[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(3): 73 – 76. (in Chinese)
- 10 饶秀勤, 应义斌, 吕飞玲, 等. 水果声学特性测试系统的研制[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 69 – 71.
RAO X Q, YING Y B, LÜ F L, et al. Development of a fruit quality inspecting system based on acoustic properties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 69 – 71. (in Chinese)
- 11 危艳君, 饶秀勤, 漆兵. 基于西瓜声学特性测定其成熟度[J]. 农产品加工·学刊, 2012(1): 8 – 10.
WEI Y J, RAO X Q, QI B, et al. The detection of watermelon maturity with the acoustic properties of watermelon[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(1): 8 – 10. (in Chinese)
- 12 孙力, 蔡健荣, 林颢, 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(5): 183 – 186.
SUN L, CAI J R, LIN H, et al. On-line detection of cracked shelleggs based on acoustic resonance analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 183 – 186. (in Chinese)
- 13 ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, AHMADI H, et al. Prediction of watermelon quality based on vibration spectrum[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86: 291 – 293.
- 14 刘鹏, 屠康, 潘磊庆. 基于计算机视觉与敲击振动融合技术检测鸭蛋壳强度[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 175 – 180.
LIU P, TU K, PAN L Q. Duck egg's shell intensity model based on fusion of computer vision and impact excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 175 – 180. (in Chinese)
- 15 张伟, 屠康, 刘鹏, 等. 基于机器视觉与敲击振动融合的鸭蛋孵化特性检测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 140 – 145. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120228&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.028.
ZHANG W, TU K, LIU P, et al. Early fertility detection of hatching duck egg based on fusion between computer vision and impact excitation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 140 – 145. (in Chinese)
- 16 姜瑞涉, 王俊, 陆秋君, 等. 鸡蛋敲击响应特性与蛋壳裂纹检测[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 75 – 78.
JIANG R S, WANG J, LU Q J, et al. Eggshell crack detection by frequency analysis of dynamic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 75 – 78. (in Chinese)
- 17 PALIWAL K. Spectral subband centroid features for speech recognition[C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998, 2: 617 – 620.
- 18 赵欢, 张林, 陈珍文. 混合窗函数和子带频谱质心在 MFCC 特征提取过程中的应用[J]. 计算机应用, 2009, 29(2): 389 – 391.
ZHAO H, ZHANG L, CHEN Z W. Using mixed window function and subband spectrum centroid in MFCC feature extraction process[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(2): 389 – 391. (in Chinese)
- 19 KONOFAGOU E, VARGHESE T, OPHIR J. Spectral estimators in elastography[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 412 – 416.
- 20 他得安, 王威琪, 汪源源, 等. 评价松质骨状况的一种背散射频谱方法[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 406 – 410.
TA D A, WANG W Q, WANG Y Y, et al. A backscattering spectrum method for assessment of cancellous bone status[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 406 – 410. (in Chinese)