

基于外部特征及子带谱质心法的西瓜糖度检测

Watermelon sugar content detection based on the external characteristics and sub-band spectrum centroid method

庄 为^{1,2} 李臻峰^{1,2} 宋飞虎^{1,2} 李 静^{1,2} 朱冠宇¹

ZHUANG Wei^{1,2} LI Zhen-feng^{1,2} SONG Fei-hu^{1,2} LI Jing^{1,2} ZHU Guan-yu¹

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)
(1. School of Mechanical Engineering of Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214222, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214222, China)

摘要:针对振动无损检测方法对硬件系统及测试条件要求较高,且实际应用系统设计很少的问题,开发便携式振动检测系统,对时间信号进行小波阈值去噪后,提取某特定西瓜品种的子带频谱质心,并提出横径的平方与纵径乘积作为体积参数。研究发现,子带频谱质心频率点与西瓜的质量、体积参数呈负相关,对激励力度依赖性较小。将质量、体积参数、子带频谱质心频率点作为变量,利用逐步多元线性回归分析和曲面建模,建立糖度检测模型。曲面建模法所建模型较好,确定系数达到 0.881 1,预测集样本的标准差 RMSEP 略大于校正集样本的,并且 RMSEP 和 RMSEC 均小于最大糖度的 10%。该模型可以很好地利用 216~268 Hz 的子带频谱质心频率点对 8~10 成熟西瓜进行糖度预测。

关键词:振动检测;西瓜糖度;子带频谱质心;逐步多元线性回归;曲面建模

Abstract: At present, the vibration nondestructive testing method has high requirements on hardware system and test conditions, and few practical application systems have been designed. In order to solve this problem, a portable vibration test detection system was built. The time signal was denoised by the method of wavelet threshold denoising. The sub-band spectrum centroid of a certain watermelon variety was extracted. The product of square of transverse diameter and the longitudinal diameter was proposed as the volume parameters. It is found that the frequency point of sub-band spectrum centroid is negatively correlated with the quality of watermelon and the volume parameters, and is less dependent on the intensity of the

excitation. Using stepwise multivariate linear regression analysis and surface modeling established the sugar detection model, and the quality of watermelon, the frequency point of sub-band spectrum centroid and the volume parameters were variables. The model established by surface modeling method is better. The determination coefficient of the model reached 0.881 1, the standard deviation of the prediction set sample RMSEP was slightly larger than the standard deviation of the calibration set RMSEC, and RMSEP and RMSEC were both less than 10% of the maximum sugar content. The model can be well used to predict the sugar content of the watermelons of the maturity of 80% to 100% with the frequency point of sub-band spectrum centroid of 216 to 268 Hz.

Keywords: vibration testing; watermelon sugar content; sub-band spectrum centroid; stepwise multivariate linear regression; surface modeling

研究和利用农产品的声学特性检测农产品品质一直受到重视^[1]。声学检测法不易受干扰,设备成本低廉、可在野外等各种环境中工作,且易实现智能化,应用前景广阔^[2]。目前对西瓜的敲击声学特性已有大量的研究,证实了通过敲击声学判断西瓜成熟度的可行性,但因设备比较昂贵,不易操作,体积较大,而不能普及^[3]。

Abbasadeh 等^[4]利用激光多普勒测振仪检测西瓜的成熟度;Mao 等^[5]利用麦克风、数据采集卡(DAQ 卡)等设备组成声学装置检测西瓜的成熟度;Taniwaki 等^[6-7]利用激光多普勒测振仪检测西瓜,利用第二共振频率 f_2 研究西瓜的成熟度;陆勇等^[8]利用 NI 采集卡、加速度传感器、适调仪等设备搭建声学振动检测平台,建立第一响应基频频率和贮藏时间的模型;高宗梅^[9]^[11-17]利用激光多普勒测振系统检测西瓜,提取 3 个共振峰频率和幅值为特征参数。目前,通常使用共振峰位置^[8]、声透过程^[1]、共振峰高度^[9]^[16]等作为声学振动检测的特征值,但准确获得这些参数,需要性能较好的硬

基金项目:国家自然科学基金(编号:515082290);江苏省产学研联合创新资金(编号:BY2014023-32);政策引导类计划(产学研合作)-前瞻性联合研究项目(编号:BY2015019-16)

作者简介:庄为,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:李臻峰(1968—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: 2996582592@qq.com

收稿日期:2018-03-05

件以及良好的检测条件,从而提高了成本,并且应用场合受到限制。

为了减少成本以及降低对应用场合的依赖性,不仅要简化硬件,而且要选用对硬件以及检测条件依赖较小的特征参数。因此,利用自行开发的便携式振动检测系统对某品种西瓜进行检测,对时间信号进行小波阈值去噪后,提取子带频谱质心作为特征值,提出横径的平方与纵径乘积作为体积参数,同时研究质量、激励力度和体积参数对子带频谱质心频率点的影响,利用逐步多元线性回归分析和曲面建模,建立糖度检测模型。

1 材料和方法

1.1 试验样本及其处理

西瓜:早佳 8424,成熟度为 8~10,样本的数目为 61 个(校正集 51 个和预测集 10 个),2017 年 7 月采摘于无锡市某大棚,确保西瓜没有空心且无损伤。选定西瓜样本后,对西瓜进行清洗,自然晾干。西瓜外观基本参数见表 1。试验在实验室内完成,控制室内的相对湿度为 60%,温度设置为 25℃。

表 1 西瓜外观基本参数

Table 1 The basic parameters of watermelon appearance			
参数	质量/g	纵径/cm	横径/cm
最小值	2 529.60	17.26	17.22
最大值	6 598.40	26.16	25.30
平均值	4 176.50	21.33	21.04

1.2 试验设备

加速度传感器:352C68 型,美国 PCB 公司;
数字手持折射仪:PAL-1 型,日本爱拓公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验系统搭建及手拍击测试 系统由加速度传感器(型号 352C68,灵敏度为 100 V/g,谐振频率≥35 kHz)、小型电子耳、计算机和工作台组成(图 1)。工作台材料为硬质海绵。小型电子耳是自主研发的 STM32 数据采集及处理系统。西瓜置于工作台上,使瓜脐和瓜蒂方向处于水平,由于在瓜脐位置检测、瓜蒂位置拍击时子带频谱质心频率点能够更好地描述糖度^[10],加速度传感器通过蜂蜡^[10]贴于瓜脐部位,手拍击瓜蒂部位,振动信号通过传感器,经小型电子耳传送给电脑。小型电子耳的程序通过 keil5 编写,可以控制采集过程和数据处理以及结果显示。

1.3.2 研究敲击力度对子带频谱质心影响 本研究分析不同敲击力度对子带频谱质心的影响,手拍击的情况下不能精

确控制拍击力度的大小,因此,试验时在上述试验系统基础上设置小球摆动装置以及刻度板。如图 2 所示,将木质小球分别从 30°,45°,60°的位置释放,小球敲击西瓜瓜蒂位置,控制其它因素相同,以此模拟不同力度的敲击。

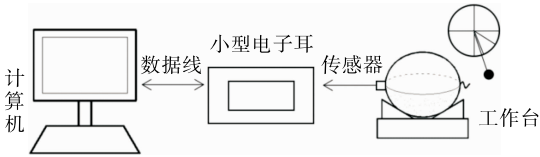


图 2 不同敲击力度振动检测系统图

Figure 2 The diagram of different tap strength vibration testing system

1.3.3 糖度测量 将西瓜沿着瓜蒂和瓜脐对半切开,取西瓜的不同部位(瓜脐,瓜蒂,中心)瓜瓢榨汁,利用 PAL-1 型数字手持折射仪测量,每次测量前须清洗清零。每个西瓜样本取 3 次进行测量,然后取平均值。

1.4 数据处理

1.4.1 时间信号的小波阈值去噪 小波分析具有优良的时频分析能力,因此被广泛应用于非平稳信号处理及特征提取^[11]。采用小波阈值法去噪,通过 Matlab R2015a 编写处理程序,首先对信号进行正交小波变换,然后设一阈值,保留大于阈值的小波系数,将小于阈值的小波系数进行削弱。最后,将阈值处理后的小波系数进行重构,从而得出信号。

1.4.2 子带频谱质心特征 在语音识别系统中,常用子带频谱质心法对特征值进行提取。子带频谱质心的提取按式(1)实现。

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

式中:

- C——质心在频率轴上的位置;
- f_c ——子带中心频率,Hz;
- Δf ——半子带宽度,Hz;
- $w(f)$ ——各子带滤波器组,全取 0 或全取 1;
- $A(f)$ ——频率点 f 处的能量密度,即频率点 f 处的幅值。

对于每一个子带来说,用 f_c 表示该子带的中心频率,半子带宽度 Δf 则表示子带的边界到子带中心频率的距离。 $f_c + \Delta f$ 、 $f_c - \Delta f$ 为子带的上限频率和下限频率。语音信号是一种非平稳的时变信号,通常采用一个长度有限的窗函数来截取语音信号形成语音帧,因此需要利用子带滤波器组 $w(f)$ 。

2 结果与分析

2.1 小波阈值去噪对振动信号及特征值提取的影响及最优子带频谱质心的提取

图 3(a)信号中包含大量随机干扰信号,图 3(b)是滤波后的信号图,通过小波阈值去噪,信号变得更加平滑。时间信号经去噪后进行 FFT,利用 MATLAB 编写程序提取最优

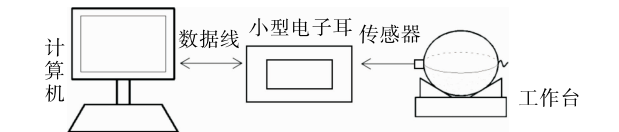


图 1 西瓜敲击振动检测系统图

Figure 1 Vibration testing system for watermelon

的子带频谱质心。由于拍击力量不能准确控制,人为因素对质心高度影响较大,因此,研究子带频谱质心的水平位置(频率点)与糖度的关系。

为了找到最优的子带频谱质心,以步长 4.88 Hz 将样本的频谱在 0~1 220.7 Hz 内分成 15 750 个子带,由于校正集有 51 个样本,所以采集 51 组数据,共有 51 组子带。将每组相同位置的子带频谱质心频率点与糖度建立线性回归模型,然后根据确定系数的大小确定最优子带,将最优子带代入式(1) 计算得出最优子带频谱质心频率点。

图 4 为滤波前后最优子带频谱质心提取分析图,用确定系数表示色轴强度,根据颜色的分布,可以清晰地看出各子带频谱质心频率点与糖度的相关性,白色部分表示的相关性较低,红色部分表示相关性较高。由图 4(a)可知,当子带中心频率为 551.44 Hz、半子带宽度为 190.24 Hz 时,确定系数 R^2 最高,为 0.800 1,其附近区域的颜色为红色和黄色,确定系数较高;由图 4(b)可知,滤波后最优子带的位置不变,确定系数达到 0.832 1,红色区域颜色加深并且面积扩大。可见小波阈值去噪法有效地对信号进行了降噪。选取子带中心频率为 551.44 Hz、半子带宽度为 190.24 Hz 的子带为最优子带,选取该子带的频谱质心为最优子带频谱质心,建立该子带的频谱质心频率点与糖度的模型。

2.2 质量对子带频谱质心频率点的影响

Mao 等^[5] 研究发现西瓜的声学特征受西瓜质量的影响很大,其共振频率与西瓜质量呈负相关。因此,本研究有必要研究西瓜质量是否对子带频谱质心频率点有影响。

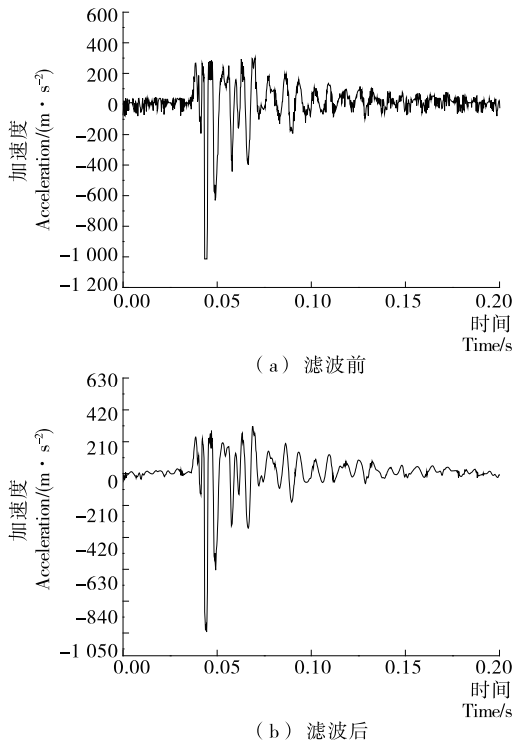


图 3 滤波前后加速度冲击响应信号
Figure 3 Acceleration shock response acceleration signals filtering before and after the shock response signal filtering signal

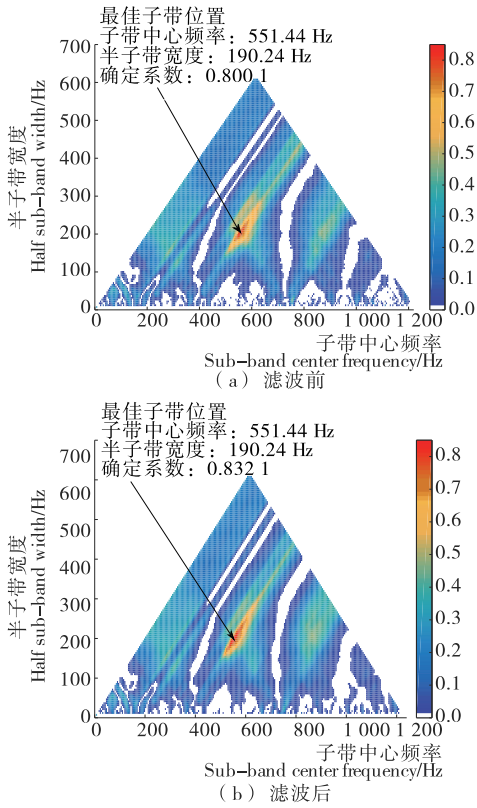


图 4 滤波前后最优子带频谱质心提取分析图
Figure 4 The analysis diagram of the optimal sub-band spectrum centroid extraction before and after filtering

根据西瓜的质量将其划分为四类,1、2、3 和 4 分别表示质量范围是 2 500~3 500,3 500~4 500,4 500~5 500,5 500~6 500 g 的西瓜,各类西瓜样本个数分别为 23,10,9,9。从图 5(a)看出,对四类西瓜分别进行线性回归分析,各类西瓜的确定系数有提高,甚至 2、3 和 4 类的确定系数大于 0.9。可见,质量对质心频率点及建模有一定的影响。王书茂等^[12] 研究发现西瓜的第 1 阶固有频率与含糖量有较好的关系。因此为了进一步分析质心频率点与质量关系时,需要考虑糖度的影响。分析发现当糖度<6.9%时,频率点集中分布在 530 Hz 以上,均值达到 530 Hz,糖度介于 6.9%~7.6%时,频率点集中分布在 500~525 Hz,均值达到 520 Hz,当糖度>7.6%时,频率点集中分布在 500 Hz 以下,可见以糖度 6.9%和 7.6%为界可以明显地分开频率点。同理,根据频率点的差异,发现以糖度 6.9%,7.6%,8.3%,9.0%,9.7%,10.4% 作为分类界限的效果较好。根据西瓜的糖度将其划分为 7 类,分别为 1、2、3、4、5、6 和 7 表示糖度范围为 6.2%~6.9%,6.9%~7.6%,7.6%~8.3%,8.3%~9.0%,9.0%~9.7%,9.7%~10.4%,10.4%~11.1% 的西瓜。如图 5(b)所示,分别对各类西瓜的频率点进行线性回归分析,各线性模型的斜率相近,在同一糖度范围内,西瓜的质量与频率点呈负相关,与 Mao 等^[5] 的结论相似。

2.3 横、纵径对子带频谱质心的影响

西瓜可以简化为多层球状弹性体^[12]。球体的固有频率

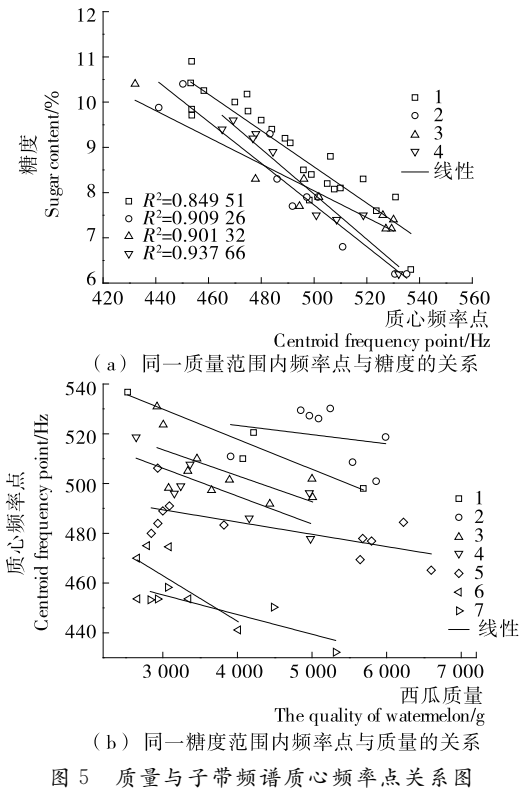


Figure 5 The diagram of mass and sub-band spectrum centroids frequency point

与其材料的密度、几何尺寸和弹性模量等因素有关^[12]。可见,通过子带频谱质心建模时,有必要研究西瓜几何尺寸是否对子带频谱质心频率点有影响。实际应用中,测量西瓜的体积比测量横、纵径复杂,如果用体积作为变量会大大增加系统的复杂度,不利于工程应用,球体的体积正比于半径的三次方,因此提出横径的平方与纵径乘积 d_{12} 作为体积指标来研究横、纵径对子带频谱质心的影响。

图 6(a)为 d_{12} 与子带频谱质心频率点关系图,随着 d_{12} 的增大,频率点有下降的趋势,西瓜的 d_{12} 与频率点呈负相关,但是 d_{12} 与频率点的相关性较低。根据西瓜的体积参数将其划分为四类,分别为 1、2、3 和 4 表示体积参数范围为 5 000~7 000, 7 000~9 000, 9 000~11 000, 11 000~13 000 cm^3 的西瓜。如图 6(b)所示,分别对各类西瓜的频率点进行线性回归分析,1、2、3 类的确定系数减小,可见,虽然整体上 d_{12} 与频率点呈负相关,但将 d_{12} 作为因素分析糖度建模的效果不佳。

2.4 拍击力度对子带频谱质心的影响

如图 7 所示,对比锤头分别从 30° 、 45° 、 60° 激励西瓜的振动频谱,以子带中心频率为 551.44 Hz、半子带宽度为 190.24 Hz 的子带为例,提取并用点标出各组曲线在该子带处的频谱质心。可见,力度越大,曲线的幅值越大,子带频谱质心的高度变化较大,但是子带频谱质心频率点的变化很小,几乎不变。按照弹性体振动理论,由冲击造成的振动响应的频率是弹性体的固有频率^[12],力的大小影响振动的幅度,而振动频率与激励力无关。因此,子带频谱质心频率点对拍击力度的依赖性较小。

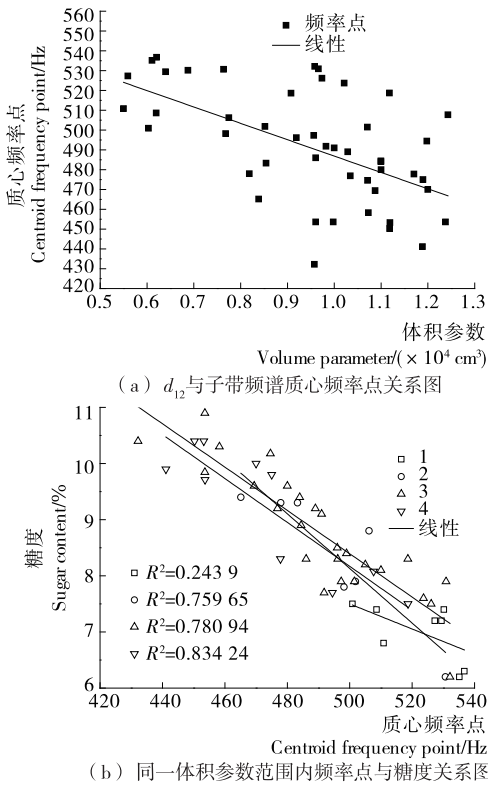


Figure 6 The diagram of the d_{12} of all watermelon samples and sub-band spectrum centroids frequency point

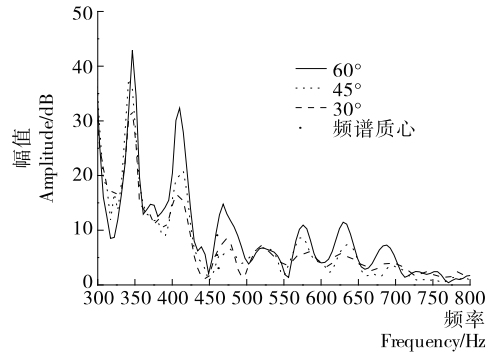


Figure 7 The analysis diagram of the influence of different strength on sub-band spectrum centroid

2.5 利用子带频谱质心频率点建立模型

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估计糖度的方法^[10]。

2.5.1 利用逐步多元线性回归建模 建立糖度预测模型时,只利用子带频谱质心频率点作为变量不够全面,需要考虑质量、体积参数的影响。当有多个自变量时,各自变量之间可能存在相互关联,因此可以利用逐步多元线性回归分析筛选 3 个变量,建立效果更好的模型。

利用 SPSS 21.0 软件进行建模,变量逐步引入,在每一步 F 的概率小于设置值的自变量被引入, F 的概率大于设置值

的自变量被移除,当没有更多的变量被纳入或移除的时候逐步多元线性回归就结束了。为了量化模型的预测能力,得到模型的确定系数和标准估计的误差,如表 2 所示,只用频率点建模时,确定系数较低,标准估计的误差较大,当依次代入质量、横径的平方与纵径乘积建模时,确定系数依次升高,标准估计的误差依次降低。因此,选用模型: $T=-0.000\ 165m-0.038C+0.000\ 062d_{12}+27.205$ 。

表 2 子带频谱质心频率点与物理参数建立模型的比较[†]
Table 2 The comparison of the model built by sub-band spectrum centroid frequency point and the physical parameters

特征	模型	确定系数	标准估计误差
C、T	$T=-0.041\times C+28.822$	0.832	0.531
C、m、T	$T=-0.000\ 195\times m-0.04\times C+28.152$	0.845	0.523
C、m、d ₁₂ 、T	$T=-0.000\ 165\times m-0.038\times C+0.000\ 062\times d_{12}+27.205$	0.847	0.521

[†] T 表示样本糖度,%;C 表示样本子带频谱质心频率点,Hz;m 表示样本质量,g。

2.5.2 曲面建模 曲面拟合是通过试验测得的数据来求目标函数与 2 个变量之间的关系式,使试验测试点尽可能地分布在关系式所表示的曲面上。

通过图 5(a)和 6(b)可知,将质量作为因素分析糖度建模的效果较好,因此选择质量和子带频谱质心频率点作为变量对糖度进行曲面建模。选取频率点相同或相近的样本来研究质量与糖度的关系,由于频率点较离散,选取的样本数较少。如图 8 所示,通过多项式拟合发现,当质量维度为 4 时,糖度与质量的拟合关系较好。同理,分析质量相近时糖度与频率点的关系,如图 9 所示,糖度与频率点的线性关系和二次关系均较好。因此分别通过式(2)、(3)进行曲面拟合:

$$T=a+b\times x+c\times y+d\times x\times y+e\times y^2+f\times x\times y^2+g\times y^3+h\times x\times y^3+i\times y^4,$$
 (2)

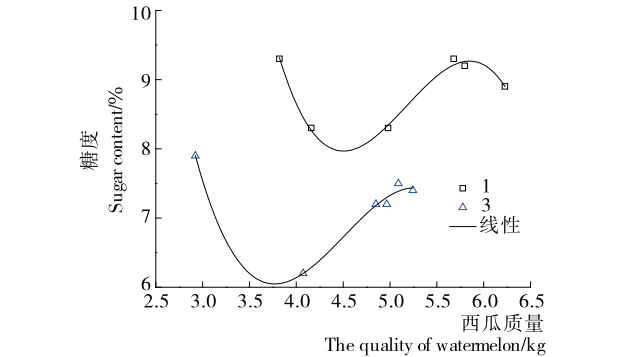


图 8 频率点相同或相近时质量与糖度关系图
Figure 8 The diagram of the quality and the sugar content of the same or similar frequency points

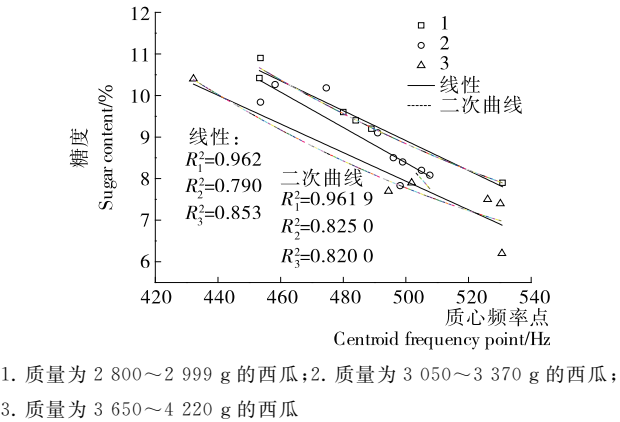


图 9 质量相同或相近时频率点与糖度关系图
Figure 9 The diagram of the frequency points and the sugar content of the same or similar quality

$$T=a+b\times x+c\times y+d\times x^2+e\times x\times y+f\times y^2+g\times x^2\times y+h\times x\times y^2+i\times y^3+g\times x^2\times y^2+k\times x\times y^3+l\times y^4,$$
 (3)

式中:
x——频率点,Hz;
y——质量,g;
T——糖度,%。

利用 MATLAB 中的 curve fitting 工具箱进行建模,利用式(2)进行曲面建模的确定系数为 0.878 4,标准误差为 0.497 7,而利用式(3)进行曲面建模的确定系数为 0.881 1,标准误差为 0.480 0,因此利用式(3)进行曲面建模。图 10 为曲面建模分析图。

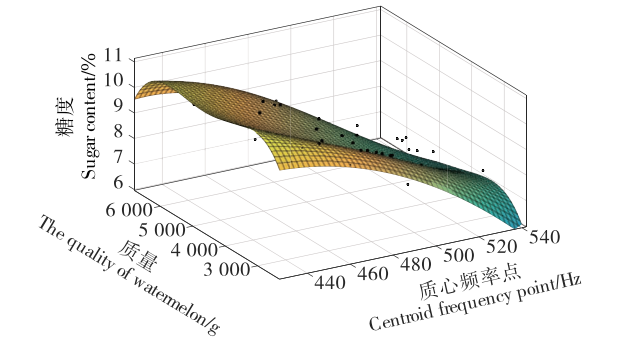


图 10 曲面建模分析图
Figure 10 The analysis diagram of surface modeling

2.5.3 模型的确定 将曲面建模法与逐步多元线性回归法建立的模型进行比较,曲面建模法所建模型的确定系数较大,标准误差较小,因此选用该模型作为糖度预测模型,模型如下:

$$T=-424.6+1.719\ x+0.237\ 6y-0.001\ 833x^2-0.000\ 855\ 4xy-3.631\times 10^{-5}\ y^2+8.899\times 10^{-7}\ x^2\ y+1.005\times 10^{-7}\ xy^2+1.948\times 10^{-9}\ y^3-1.032\times 10^{-10}\ x^2\ y^2-2.267\times 10^{-13}\ xy^3-1.024\times 10^{-13}\ y^4.$$
 (4)

2.6 预测模型的验证及误差分析

图 11 为糖度预测模型的预测能力分析图,校正集样本数为 51 个,预测集样本数为 10 个,校正集样本的标准差

(RMSEC)为 0.101,预测集样本的标准差(RMSEP)为 0.217。RMSEP 略大于 RMSEC,并且 RMSEP 和 RMSEC 均小于最大糖度的 10%。表 3 为预测集样本的实际糖度值与预测糖度值的比较及误差分析结果,预测集样本平均误差为 3.61%。可见,该糖度预测模型可以很好地利用 216~268 Hz 的子带频谱质心频率点对 8~10 成熟西瓜进行糖度预测。

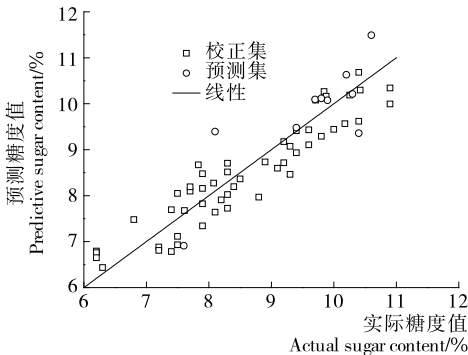


图 11 糖度预测模型的预测能力分析图
Figure 11 The prediction ability analysis diagram of the sugar content prediction model

表 3 预测集样本实际糖度值与预测糖度值的比较及误差分析

Table 3 The comparison and error of the actual sugar content and the predictive sugar content of the prediction set sample %

样本	实际测量值	模型测量值	相对误差	平均误差
1	9.9	9.42	4.81	3.61
2	7.6	7.32	3.66	
3	10.3	9.81	4.67	
4	10.6	10.87	2.59	
5	9.7	9.95	2.64	
6	10.4	10.12	2.69	
7	8.1	8.42	3.96	
8	9.4	9.13	2.82	
9	10.2	10.57	3.69	
10	9.8	9.34	4.59	

课题组前期利用信号调理仪、数据采集卡、加速度传感器等仪器搭建系统检测西瓜糖度,主要利用共振峰作为特征参数,也有研究^[10]尝试利用子带频谱质心作为特征参数,但是没有考虑到外部特征的影响,建模方法较简单,相关性较低,并且系统较为复杂,不易携带,检测时易对西瓜表面造成损伤。目前,大多数研究利用较复杂的设备检测西瓜糖度,比如激光多普勒测振系统^{[9]11}、利用数据采集卡等设备搭建的振动检测系统^[8],但是得到的糖度预测模型的预测效果较差,虽然模型的相关系数能够达到 0.8^[1],但是校正均方根误差和预测均方根误差较大,甚至均达到 1.5^{[9]41},而本研究所得模型的确定系数为 0.881 1,校正均方根误差和预测均方根误差均不超过 0.3。因此,利用小型电子耳系统检测西瓜糖度,将外部特征与子带频谱质心频率点结合,不仅优于传统的检测方法,而且更具有实际意义。

3 结论

本研究利用自行开发的便携式声学振动检测系统基于外部特征及子带频谱质心对西瓜糖度进行检测,以早佳 8424 西瓜品种为研究对象,通过手拍击方式激励西瓜。对时间信号进行小波阈值去噪后,提取了振动信号的子带频谱质心,并提出了横径的平方与纵径乘积 d_{12} 作为体积参数。研究发现频率点与西瓜的质量、 d_{12} 呈负相关,对激励力度依赖性较小。选取子带中心频率为 551.44 Hz、半子带宽度为 190.24 Hz 的子带为最优子带,提取该子带的频谱质心,利用逐步多元线性回归分析以及曲面建模法,建立糖度检测模型。研究发现利用曲面建模的确定系数较高,为 0.881 1,标准误差较小,为 0.480 0,因此选用曲面建模作为糖度预测模型。研究发现 RMSEP 略大于 RMSEC,并且 RMSEP 和 RMSEC 均小于最大糖度的 10%,预测集样本平均误差为 3.61%。可见,该糖度预测模型可以很好地利用 216~268 Hz 的子带频谱质心频率点对 8~10 成熟西瓜进行糖度预测。本研究从实用的角度出发,将子带谱质心法与外部特征结合,简化了硬件并降低了对应用场合的要求,但本研究只是对适熟瓜进行检测,还需要进一步对未熟西瓜、过熟西瓜进行研究。

参考文献

[1] 危艳君, 饶秀勤, 漆兵. 基于声学特性的西瓜糖度检测系统[J]. 农业工程报, 2012, 28(3): 283-287.

[2] 应义斌, 蔡东平, 何卫国, 等. 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): 209-211.

[3] 朱志英. 音频信号采集装置在西瓜成熟度检测中的应用[J]. 现代农业, 2014(9): 20-22.

[4] ABBASZADEH R, RAJABIPOUR A, DELSHAD M, et al, E-valuation of watermelons texture using their vibration responses[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 102-105.

[5] MAO Jian-hua, YU Yong-hua, Rao Xiu-qin, et al. Firmness prediction and modeling by optimizing acoustic device for water-melons[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 168: 1-6.

[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]. Post-harvest Biology and Technology, 2010, 56(1): 101-103.

[7] TANIWAKI M, TAKAHASHI M, SAKURAI N. Determination of optimum ripeness for edibility of postharvest melons using nondestructive vibration[J]. Food Research International, 2009, 42(1): 137-141.

[8] 陆勇, 李臻峰, 浦宏杰, 等. 基于声振法的西瓜贮藏时间检测[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(4): 682-687.

[9] 高宗梅. 激光多普勒测振技术用于西瓜成熟度检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[10] 浦宏杰, 汪迪松, 李臻峰. 基于振动频谱子带质心的西瓜内部品质检测[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 281-288.

[11] 陈果. 基于小波分析的转子故障信号自适应降噪技术研究[J]. 航空动力学报, 2008(1): 9-16.

[12] 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.