

# 基于声振频带幅值特性香梨硬度无损检测研究

王志鹏, 吴杰, 赵正强, 娄来峰, 张慧

(石河子大学机械电气工程学院, 教育部绿洲特色经济作物生产机械化工程研究中心, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 本文采用压电梁式传感器对香梨进行激励感测, 分析了该装置采集的响应信号的稳定性, 研究了频带幅值参数与香梨硬度的相关性, 并采用频带幅值参数对其硬度进行主成分回归(PCR)分析, 建立香梨硬度的检测模型。研究表明: 香梨声振检测装置的时域和频域信号稳定, 在 320~880 Hz 波段可提取 8 个频带幅值参数, 它们与 M-T 检测硬度的相关系数最高仅为 0.63, 采用这些频带幅值 PCR 法构建的香梨硬度检测模型的校正集和验证集相关系数  $r_c$  与  $r_v$  分别为 0.77 和 0.66, 均方根误差  $RMSEC$  和  $RMSEV$  分别为 1.23 和 1.59, 对香梨硬度的检测敏感度仅为 51.56%, 模型检测性能较低、稳定性较差; 引入香梨质量对模型修正,  $r_c$  和  $r_v$  分别升高到 0.81 和 0.72,  $RMSEC$  和  $RMSEV$  分别降低为 1.13 和 1.44, 模型的检测性能和稳定性得到明显提高, 对香梨硬度变化的敏感度提高至 58.28%, 与 M-T 检测法敏感度的差异仅为 6.21%, 可以适用于香梨硬度的无损检测。

**关键词:** 香梨; 频带幅值; 硬度; 无损检测; 主成分回归分析

文章编号: 1673-9078(2016)12-343-349

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.052

## Non-destructive Measurement of Acoustic Vibration Band Amplitude Features to Evaluate Stiffness in Korla Pear

WANG Zhi-peng, WU Jie, ZHAO Zheng-qiang, LOU Lai-feng, ZHANG Hui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Research Center of Oasis Agricultural Mechanization, Ministry of Education, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** A stable non-destructive detection method based on the band magnitude features of acoustic vibration response was investigated for evaluating the stiffness of Korla pear. An experimental setup using piezoelectric beam sensors was developed and built for obtaining band magnitude features of Korla pear. The stability of the experimental system was analyzed. The band magnitude parameters were acquired by the normalized spectrum magnitude of response signal between 320 and 880 Hz. The correlation between eight band magnitude parameters and the stiffness measured with M-T method was studied. The stiffness detection model was acquired by principal component regression (PCR) analysis of the relationships between different band magnitude parameters and stiffness. The results of repeated excitation at the same point showed that the experimental system was stable and reliable. A low correlation was found between every band magnitude parameter and stiffness and the maximum correlation coefficient was only 0.63. The stiffness detection PCR model showed a good correlation. The correlation coefficient for calibration and validation of the model were 0.77 and 0.66, respectively, while the root mean square error of calibration and validation was 1.23 and 1.59, respectively. The detection sensitivity of the model was 51.56%. The modified model with mass had higher correlation coefficients and lower root mean square errors. The detection sensitivity (58.28%) of the modified model was more similar to that of M-T method for pear stiffness measurement. Therefore, this model can be used for non-destructive measurement of Korla pear internal quality.

**Key words:** Korla pear; band amplitude; stiffness; non-destructive measurement; principal component regression

库尔勒香梨果肉酥脆, 香味浓郁, 是国家地理标志保护的新疆特色果品。近年来, 随着香梨产业发展,

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31560476); 新疆兵团博士资金项目(2013BB11)

作者简介: 王志鹏(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品品质无损检测

通讯作者: 吴杰(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品品质无损检测

香梨种植面积不断扩大, 产区已从库尔勒地区扩展到阿克苏和喀什地区。不同产区光热水土及园艺培育影响, 使香梨内部品质产生较大差别<sup>[1]</sup>。此外, 即使是在同一果园, 香梨也有大量口感较差的粗皮果<sup>[2]</sup>。这些品质良莠不一的香梨大量充斥市场, 恶性竞争, 影响了香梨声誉, 降低了香梨产业整体经济效益。因此, 如何检测判别香梨的内部品质差异, 是香梨产业急需解决的问题。

香梨硬度是区分不同产地香梨内部品质及粗皮

果的重要指标之一, 果农通常依靠视觉、手感等经验方法判别, 但易疲劳且检测结果受主观影响大。基于 M-T 检测法的水果硬度计或质构仪可准确检测果实硬度, 但属于破坏性方法。如何实现香梨硬度实时在线无损检测, 才是实现香梨内部品质自动化分级技术的关键。

在已有大量农产品品质无损检测技术中, 光谱法和声振法都可评判果实的硬度。近红外光谱或高光谱法是研究热点, 但韩东海和王加华(2008)指出, 近红外光谱对果实硬度的准确定量计算尚有一定难度, 不利于果品分级<sup>[3]</sup>; 高光谱法通过融合光谱和图像数据可提高检测准确率, 但由于获取大数据图谱信息的时间长且处理难度大, 从而使搭建的检测装置价格昂贵, 无法满足实时快速检测的实际要求<sup>[4,5]</sup>。与之相比, 声振法检测装置较为低廉, 检测分析迅速, 可满足市场商业化应用需求。在声振法检测的研究中, 多数都采用共振频率评估果蔬硬度, 但是在自谱分析时采样点数和频带宽度限制了频率分辨率不能过高, 当果实内部品质差异不是很大时, 这就可能导致共振频率变化值低于频率分辨率而无法判别品质差异。为了克服这一局限, 国外有研究采用频带幅值法, 即细化多个频带以提取对应幅值信息, 挖掘出最敏感于果蔬内部品质变化的某一频带幅值<sup>[6-8]</sup>。近年来, 国内也有研究提出用多个频带的幅值构建向量矩阵以评估西瓜的成熟度<sup>[9]</sup>。这些研究表明, 如果能够有效利用频带幅值的特征信息, 有可能实现香梨坚实度较为精确地分级。

因此, 本文采用压电梁式传感器对香梨硬度进行了无损检测研究, 测试分析了香梨声振响应特性, 提取频带幅值参数, 并基于各幅值参数进行了香梨硬度检测模型的构建和评估, 为今后香梨硬度声振法无损检测的应用研究提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 香梨试样

表 1 香梨试样的基本物性参数

Table 1 Material properties of Korla pear samples

物性参数	平均值	最大值	最小值	标准差
质量/g	124.24	190.30	93.33	16.30
果形纵横比	1.18	1.34	1.03	0.06
硬度/(N/mm)	8.53	17.17	5.41	2.28

注: 果形纵横比为香梨肩高与赤道部直径之比。

处于青熟期的香梨试样于 2014 年采收期在新疆库尔勒同一果园采摘, 香梨试样的基本物性参数见表 1。剔除畸形、损伤及病虫害的试样, 立即贮藏于

-2~0 °C、相对湿度 85%~95%的冷库中以备试验, 试验前在 22~24 °C 的常温条件下回温 24 h。

### 1.2 主要仪器设备

声振测试系统: Q220-A4-303YB 压电梁式传感器, 美国 PIEZO SYSTEMS 公司; HA-405 型电压放大器, 台湾品致公司; VibPilot 振动控制与动态信号采集分析仪, SO Analyzer 4.1 振动噪声测试分析与报告软件系统, 德国 m+p 国际公司。

香梨物性测试装置: TA.XTPlus 物性测试仪及配套的 Texture Exponent 32 软件, 英国 Stable Micro System 公司; SB-A 电子计数天平, 海宁盛博衡器有限公司; 111N-101 电子数显卡尺, 桂林广陆数字测控股份有限公司。

### 1.3 香梨硬度的 M-T 检测方法

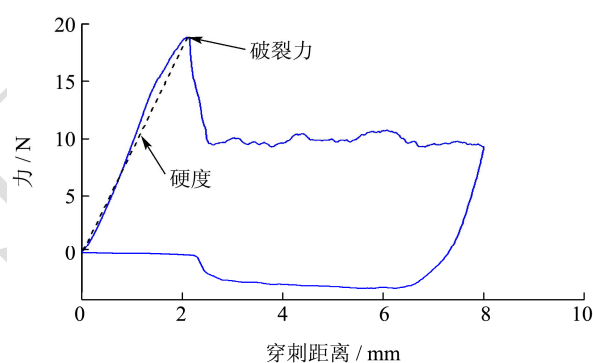


图 1 典型的香梨穿刺力-变形曲线

Fig.1 Typical force-deformation curve of Korla pear

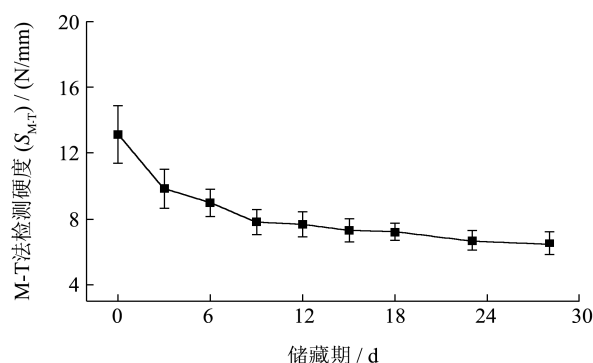


图 2 常温条件下香梨硬度随储藏时间的变化

Fig.2 Change of stiffness of Korla pear with storage time at room temperature

采用 TA.XT Plus 质构仪在香梨赤道部随机选取 5 个点进行带皮穿刺测试, 选用直径为 5 mm 的圆柱体探头, 穿刺速度设定为 1 mm/s, 穿刺深度为 8 mm。图 1 为香梨典型穿刺试验的力-变形曲线图, 硬度根据香梨穿刺破裂前曲线的斜率计算得出<sup>[10]</sup>, 取 5 次测量结果的平均值作为香梨的硬度  $S_{M-T}$ , 在常温环境香梨

硬度随贮藏时间的变化如图 2 所示。

### 1.4 声振测试系统及测试方法

#### 1.4.1 测试系统

如图 3 所示, 声振无损测试装置由压电梁式传感器、电压放大器、振动控制与动态信号采集分析仪、试验台架和计算机等组成。试样由台架果床上软质聚乙烯泡沫自由支撑<sup>[11]</sup>, 固定安装的 2 条压电梁式传感器依靠自身弹力保证与其接触, 并分别用做信号的激励和感测。传感器悬臂梁尺寸为 31.9 mm×12.7 mm×0.51 mm, 由两层 0.19 mm 厚的压电陶瓷 PZT 材料分别贴合在铜垫片上下表面, 压电材料的相对介电常数为 1800, 压电应变常数  $d_{33}$  为  $390 \times 10^{-12}$  C/N<sup>[12-13]</sup>。

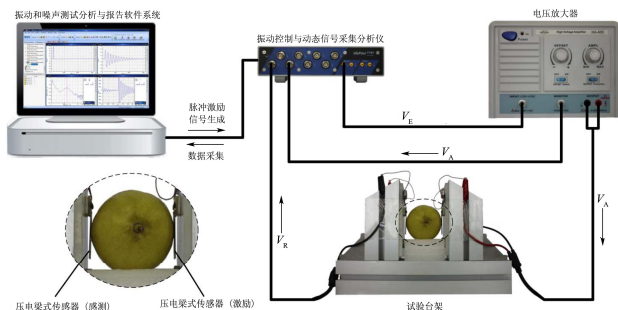


图3 香梨硬度声振检测系统

Fig.3 Photograph of acoustic testing setup for evaluating the stiffness of Korla pear

注:  $V_E$ 为原始激励信号;  $V_A$ 为放大后的激励信号;  $V_R$ 为响应信号。

#### 1.4.2 声振响应测试方法

为了获取原始激励信号  $V_E$ , 本研究参考文献<sup>[14]</sup>中所采用的试验方法, 在试验前先随机挑选一个试样, 用橡胶锤头力锤以不造成香梨发生损伤的 15 N 的力激励香梨赤道部, 然后采用 VibPilot 信号采集分析仪及 SO Analyzer 4.1 软件录制生成这一力锤激励信号  $V_E$  作为原始激励信号进行香梨声振检测试验。为降低信号干扰并获取较强的激励响应信号, 使用电压放大器对  $V_E$  信号进行线性放大。考虑到传感器连续工作所能承受的额定电压为 90 V, 参考文献<sup>[13]</sup>将  $V_E$  信号线性放大为脉冲峰值电压为 80 V 的激励信号  $V_A$ , 然后通过激励端的压电梁式传感器使试样产生振动。试样振动产生的响应信号  $V_R$  被感测端的压电梁式传感器接收, 随后激励信号与响应信号都被振动控制与动态信号采集分析仪采集, 经抗混滤波、截断、采样、A/D 模数转换、数字低通滤波及加窗处理后, 由 SO Analyzer 4.1 软件进行分析处理。

试验中录制并输出的  $V_E$  信号设置峰值电压为 2.5 V; 信号采集时, 采样频率为 51200 Hz, 有效带宽为

20000 Hz, 频率分辨率  $\Delta f$  为 6.25 Hz, 采样时间为 0.16 s, 试验触发条件设置为激励信号  $V_A$  上升沿触发, 触发电平为 0.05 V。为保证信号采集完整, 预先采集量设置为 5%。参考文献<sup>[12]</sup>使用贝塞尔低通滤波器滤波, 截止频率为 1600 Hz, 图 4a 和 4b 是香梨典型的激励信号  $V_A$  及时域响应信号  $V_R$ 。基于快速傅里叶变换选用指数窗函数对采集的响应信号  $V_R$  进行自谱分析, 获取香梨的频域响应信号。为了避免试验装置固有频率的干扰, 选取 200 Hz 后的第一阶响应频率作为香梨的共振频率  $f_R$ , 如图 4c 所示。

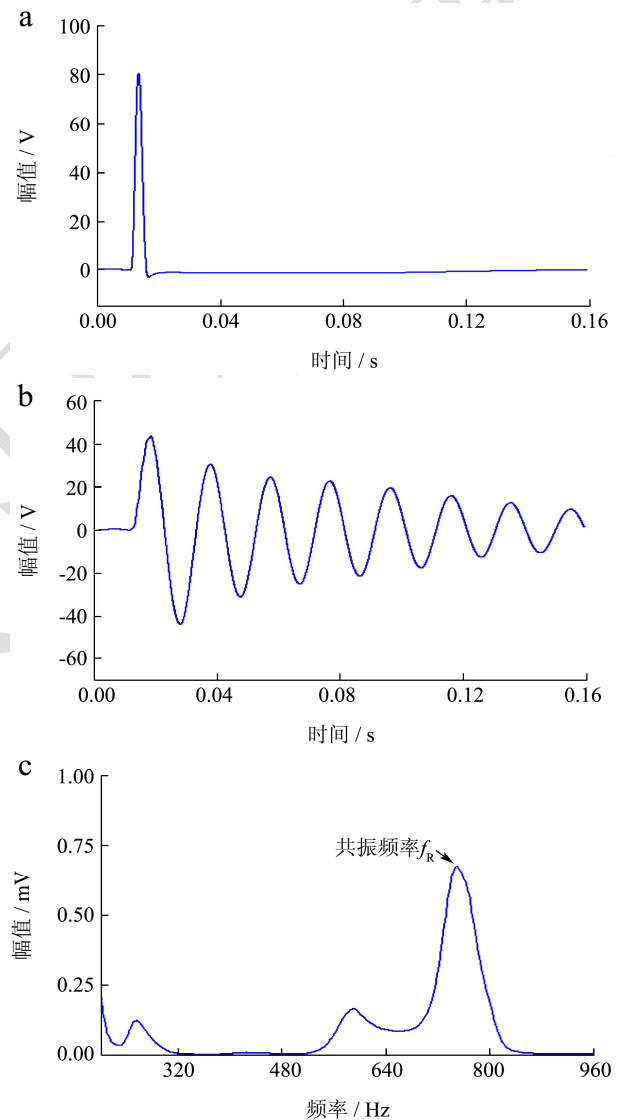


图4 香梨典型的声振信号

Fig.4 Typical acoustic vibration signal of Korla pear

注: a 为激励信号 ( $V_A$ ); b 为时域响应信号 ( $V_R$ ); c 为频域响应信号 ( $V_R$ )

### 1.5 声振频带幅值的计算方法

为避免设备固有频率的干扰, 将 300 Hz 之前的香梨频域响应信号截去, 而 900 Hz 之后的波形幅值很

低,可忽略其幅值信息。因此,取 300~900 Hz 范围波段用于分析。虽然不同成熟度香梨共振频率在 375~800 Hz 之间变化(如图 5 所示),但该波段幅值之和只占截取信号幅值总和的 87%,为了更全面提取信号幅值信息,选取占信号幅值总和 98%的 320~880 Hz 波段进行频带划分。在预研究时,参考文献<sup>[9]</sup>,划分频带的最小间隔取 30 Hz,然后以频率分辨率  $\Delta f$  (6.25 Hz) 为递增值逐步增大划分间隔,总计尝试了 17 个不同划分间隔进行频带划分,通过下文 1.6 节所述的主成分回归(PCR)分析发现,当划分间隔为 80 Hz 时,其提取的频带幅值个数和主成分个数相对较少,主成分方差累计贡献率最大,能够以较少的参数充分代表信号的幅值信息,以便于检测模型构建。因此,本研究采用 80 Hz 间隔划分的频带结果如图 6 所示。

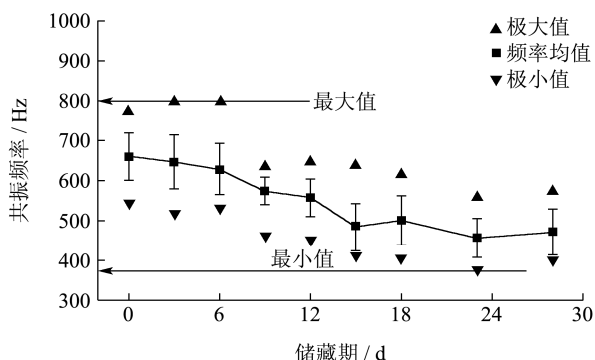


图 5 常温条件下香梨共振频率随储藏时间的变化

Fig.5 Change of the dominant resonant frequency of Korla pear with storage time at room temperature

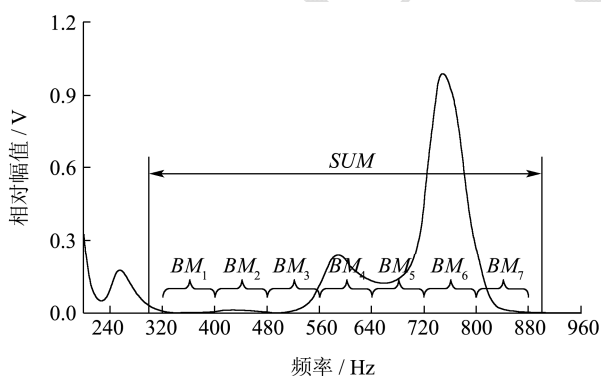


图 6 频带幅值参数的频率范围

Fig.6 Band magnitude variables and their encompassing frequency range

参考 Farabee 等<sup>[6-7]</sup>提出的频带幅值计算方法,首先将截取的频域响应信号幅值转化为相对幅值  $A$ ,即将 300~900 Hz 范围内信号的最大幅值标准化为 1<sup>[8]</sup>,然后采用公式(1)计算 300~900 Hz 范围截取信号的相对幅值总和  $SUM$ ,最后采用公式(2)计算 7 个频

带的频带幅值  $BM_n$  ( $n=1, 2\sim 7$ ):

$$SUM = \sum_{i=300}^{900} A_i \quad (1)$$

$$BM_n = \frac{\sum_{j=\alpha_n}^{\beta_n} A_j}{SUM} \quad (2)$$

式(1)和(2)中,  $A$  为频域响应信号的相对幅值;  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$  分别为频带  $n$  的起始频率和终止频率, Hz。

### 1.6 数据统计分析及香梨硬度检测模型的构建方法

随机选取 180 个香梨试样等分为 9 组,每次选用一组试样进行声振测试。每次测试后进行 M-T 法硬度检测,前后共 9 次。如图 2 所示,在 22~24 °C 的常温条件下香梨硬度下降速度前期快后期慢,因此前 7 次每 3 d 一测,后 2 次每 5 d 一测。在 28 d 的测试中部分香梨出现腐烂变质而剔除,对剩余的 148 个有效试样进行数据分析。试样按 3:1 的比例划分为校正集和验证集 2 组<sup>[10]</sup>,校正集 110 个试样,用于构建无损硬度检测模型;验证集 38 个试样,用来验证所建立硬度检测模型。校正集与验证集香梨硬度统计值如表 2 所示。

表 2 校正集与验证集香梨试样的硬度

Table 2 Stiffness of Korla pear in calibration set and validation set

样本数	M-T 法检测硬度/(N/mm)			
	均值	最大值	最小值	标准偏差
校正集 110	8.34	13.81	3.79	1.93
验证集 38	8.44	14.06	5.32	2.08

试验数据通过 SPSS 19.0 软件进行分析,在最大限度保留各频带幅值信息的前提下,本研究对校正集所有试样的 8 个频带幅值参数及香梨质量进行主成分回归(PCR)分析,根据主成分方差累计贡献率,确定要选用的主成分,然后对各主成分与标准化的硬度数据进行多元线性回归(MLR)分析,其回归方程式为:

$$Z_{SM-T} = a_0 + \sum_{l=1}^k a_l F_l \quad (3)$$

式中,  $Z_{SM-T}$  为标准化的硬度数据,  $a_0$  为回归方程截距,  $a_l$  为回归系数,  $F_l$  为要选用的主成分,  $k$  为要选用的主成分个数,  $l=1, 2\sim k$ 。

对回归方程和回归系数及截距分别进行  $F$  检验和  $t$  检验,判定回归方程可信后,将回归方程各个参数转化为原始变量以获得香梨硬度的检测模型<sup>[15]</sup>:

$$S_{M-T} = b_0 + b_1BM_1 + b_2BM_2 + b_3BM_3 + b_4BM_4 + b_5BM_5 + b_6BM_6 + b_7BM_7 + b_8SUM \quad (4)$$

式中,  $b_0$  为检测模型方程截距,  $b_1 \sim b_8$  为方程回归系数。模型的检测性能则通过校正集和验证集的相关系数  $r_c$ 、 $r_v$  和均方根误差  $RMSEC$  和  $RMSEV$  进行评估。模型相关系数越高, 均方根误差越小, 表明模型的检测性能越好; 模型的校正集与验证集间相关系数和均方根误差差异越小, 说明模型的检测稳定性越好。

### 1.7 香梨硬度检测的敏感度计算方法

为比较频带幅值检测法与 M-T 法对香梨硬度变化的敏感度, 可采用公式 (5) 计算<sup>[12]</sup>。

$$P_S = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max}} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $P_S$  为检测模型的敏感度, %;  $S_{max}$  和  $S_{min}$  分别为不同检测方法获得的香梨硬度最大值、最小值和 N/mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 香梨声振检测信号的稳定性

对香梨同一处激励感测位置重复进行 5 次试验, 结果如图 7 所示, 响应信号在时域和频域都有很好的一致性, 说明试验装置能够稳定地获取香梨的声振响应频带幅值参数。

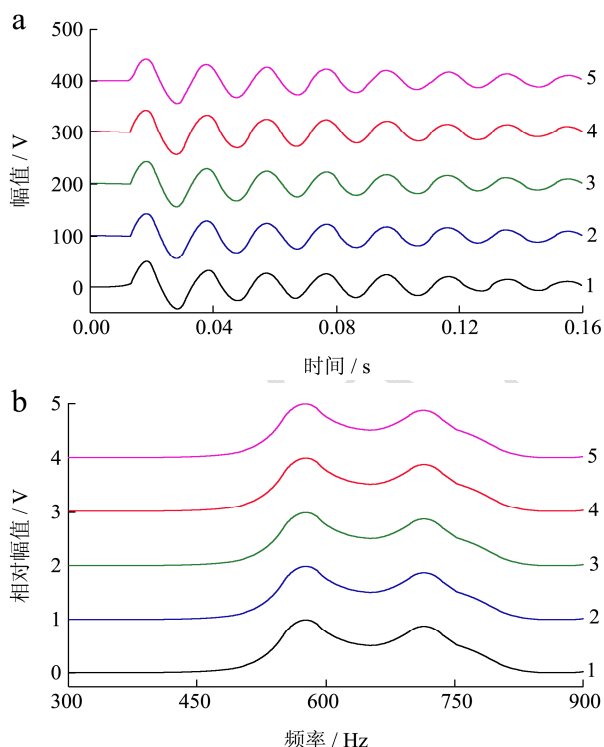


图7 同一激励点重复激励的信号

Fig.7 Fruit responses to repeated excitation at the same point

注: 为了可视, a 为时域响应信号, b 为频域响应信号。

图 a 和 b 的每个信号分别依次平移 100 和 1 个单位; 图中数字 1~5 分别用以区别相同位置重复激励感测时每次对应的信号。

### 2.2 声振参数与香梨硬度的关系

表 3 所示为 8 个幅值参数与香梨硬度之间的相关系数统计结果, 只有频带幅值参数  $BM_7$  与硬度的相关性最高, 但也仅为 0.63, 这说明单个频带幅值参数与香梨硬度的相关性较低, 不能充分代表香梨的幅值信息。

表 3 各回归参数与硬度的相关系数

Table 3 Correlations between different regression variables and the stiffness with M-T method

	$BM_1$	$BM_2$	$BM_3$	$BM_4$	$BM_5$	$BM_6$	$BM_7$	SUM
$r$	-0.43**	-0.53**	-0.59**	-0.42**	0.06	0.61**	0.63**	-0.27**

注: \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

### 2.3 基于声振频带幅值参数香梨硬度检测模型的建立

表 4 各回归参数间相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of different regression variables

	$BM_1$	$BM_2$	$BM_3$	$BM_4$	$BM_5$	$BM_6$	$BM_7$	SUM
$BM_1$	1.00							
$BM_2$	0.76**	1.00						
$BM_3$	0.32**	0.60**	1.00					
$BM_4$	-0.04	0.08	0.59**	1.00				
$BM_5$	-0.44**	-0.50**	-0.41**	0.12	1.00			
$BM_6$	-0.44**	-0.61**	-0.83**	-0.77**	0.21**	1.00		
$BM_7$	-0.29**	-0.43**	-0.65**	-0.76**	-0.24**	0.77**	1.00	
SUM	-0.07	-0.01	-0.07	0.07	0.44**	-0.002	-0.20*	1.00

注: \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ 。

表 5 共线性诊断结果

Table 5 Results of collinearity diagnosis

	$BM_1$	$BM_2$	$BM_3$	$BM_4$	$BM_5$	$BM_6$	$BM_7$	SUM
VIF	5.15	10.55	10.28	20.97	10.31	23.09	18.47	1.47

表 4 为 8 个幅值参数之间的相关性分析结果, 可以发现 5 个幅值参数之间的相关系数超过 0.75, 参数  $BM_3$  与  $BM_6$  之间相关系数甚至达到 0.83。由于多个幅值参数之间存在相关性, 这会导致幅值参数与香梨硬度回归分析的 MLR 方程及回归系数的显著性检验结果不可信。从表 5 的 8 个幅值参数的共线性诊断结果还可知, 参数  $BM_2 \sim BM_7$  的方差膨胀因子 (VIF) 均大于 10, 存在严重共线性问题, 这进一步说明幅值参数

不完全适用于 MLR 分析构建检测模型。

为了解决幅值参数间多重共线性问题，在不改变各参数信息对香梨硬度解释程度的前提下，采用 PCR 分析方法将校正集所有试样的 8 个参数标准化后进行主成分分析，主成分提取结果如表 6 所示。依据 Kaiser 准则，所要用主成分特征值应大于 1 且累计贡献率达到 80% 以上，因此提取  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  这 3 个主成分代替原来的 8 个参数作为新变量，与香梨硬度  $S_{M-T}$  标准化数据  $Z_{SM-T}$  进行 MLR 分析，这 3 个主成分的值由表 7 中与之对应的系数矩阵求解，回归方程为：

$$Z_{SM-T} = -0.37F_1 - 0.09F_2 - 0.26F_3 \quad (6)$$

表 6 主成分提取结果

Table 6 The extraction results of principal components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
$F_1$	3.70	46.26	46.26
$F_2$	2.08	26.02	72.28
$F_3$	1.08	13.44	85.72
$F_4$	0.63	7.83	93.55
$F_5$	0.27	3.32	96.87
$F_6$	0.13	1.64	98.51
$F_7$	0.10	1.30	99.81
$F_8$	0.02	0.19	100

表 7 主成分系数矩阵

Table 7 Principal component coefficient matrix

主成分	原始参数标准化后的数据							
	$Z_{BM1}$	$Z_{BM2}$	$Z_{BM3}$	$Z_{BM4}$	$Z_{BM5}$	$Z_{BM6}$	$Z_{BM7}$	$Z_{SUM}$
$F_1$	0.28	0.38	0.46	0.36	-0.15	-0.50	-0.42	0.01
$F_2$	-0.42	-0.35	0.02	0.42	0.56	-0.08	-0.31	0.37
$F_3$	0.378	0.34	-0.22	-0.28	0.25	0.09	-0.10	0.73

回归方程显著性检验  $F$  值为 52.14,  $p_{sig} < 0.001$ 。根据校正集试样个数确定自由度，确定  $t$  检验临界值  $t_{0.05, 108}$  为 1.98，回归系数的  $t$  检验结果  $|t_{a1}|$ 、 $|t_{a2}|$  和  $|t_{a3}|$  分别为 11.55、2.01 和 4.36，均高于临界值，因此判定回归方程可信。将回归方程各参数还原回原始变量得出香梨硬度检测模型为：

$$S_{M-T} = 10.02 - 9.92BM_1 - 3.72BM_2 - 2.20BM_3 - 1.17BM_4 - 0.98BM_5 + 1.86BM_6 + 3.47BM_7 - 0.05SUM \quad (7)$$

检测模型 (7) 校正集的相关系数  $r_c$  为 0.77，均方根误差  $RMSEC$  为 1.23。与校正集的结果相比，检测模型验证集的相关系数  $r_v$  为 0.66，降低了 14.29%； $RMSEV$  为 1.59，增大了 29.27%，表明该模型检测性能较低、稳定性较差，这也低于声振法类似研究检测模型的检测性能和检测稳定性<sup>[10]</sup>，因此需要对检测模型进一步修正。

## 2.4 香梨硬度频带幅值检测模型的修正

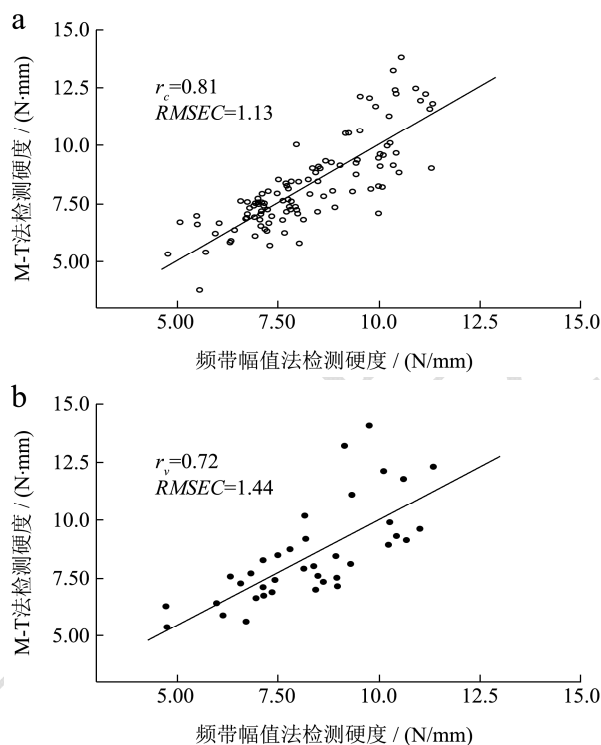


图 8 PCR 修正模型校正与验证结果

Fig.8 Calibration and validation results of the modified PCR model

注：a 为 PCR 修正模型校正结果，b 为 PCR 修正模型验证结果

有研究指出水果质量、果形对其声振响应特性有较大的影响<sup>[14]</sup>，因此将香梨质量、果形纵横比引入其硬度检测模型 (7) 进行修正，方程的修正形式为：

$$S_{M-T} = C_0 + C_1(10.02 - 9.92BM_1 - 3.72BM_2 - 2.20BM_3 - 1.17BM_4 - 0.98BM_5 + 1.86BM_6 + 3.47BM_7 - 0.05SUM) + c_2m + c_3q \quad (8)$$

式中， $c_0$  为修正回归方程的截距； $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  分别为修正回归方程的回归系数； $m$  为香梨质量， $g$ ； $q$  为果形纵横比。

修正后的回归模型的校正集相关系数提高到了 0.816，但对模型的回归系数  $t$  检验时，果形纵横比  $q$  的回归系数  $t$  检验值  $t_{c3}$  仅为 1.796，低于  $t$  检验临界值，说明修正后模型并不可信，因此剔除果形纵横比  $q$ ，只保留质量参数重新对检测模型 (7) 进行修正，得到修正回归方程 (9)：

$$S_{M-T} = -3.26 + 0.94(10.03 - 9.92BM_1 - 3.72BM_2 - 2.20BM_3 - 1.17BM_4 - 0.98BM_5 + 1.86BM_6 + 3.47BM_7 - 0.05SUM) + 0.03m \quad (9)$$

修正的回归方程显著性检验  $F$  值为 102.09,  $P_{sig} < 0.001$ ；该方程的截距及回归系数的  $t$  检验结果  $|t_{c0}|$ 、 $t_{c1}$  和  $t_{c2}$  分别为 3.33、12.64 和 4.32，均高于临界值，表

明修正回归方程可信。将修正回归方程各参数还原回原始变量得出修正后的香梨硬度检测模型为：

$$S'_{M-T} = 6.18 - 9.32BM_1 - 3.50BM_2 - 2.08BM_3 - 1.10BM_4 - 0.92BM_5 + 1.75BM_6 + 3.27BM_7 - 0.05SUM + 0.03m \quad (10)$$

修正后的检测模型(10)的校正集、验证集结果如图8所示。与检测模型(7)相比,  $r_c$  和  $r_v$  分别升高了 5.19%和 9.09%,  $RMSEC$  和  $RMSEV$  分别降低了 8.13%和 9.43%, 校正集与验证集间相关系数与均方根误差的差异分别减小了 22.25%和 6.28%, 已达到了类似声振法研究所建硬度检测模型的检测性能和稳定性<sup>[10]</sup>。

### 2.5 香梨硬度不同检测方法的比较

基于公式(5)计算不同检测方法对香梨 28 d 内硬度变化的敏感度。如表 8 所示, 修正前模型检测香梨硬度的敏感度为 51.56%, 修正后检测模型的敏感度升高到 58.28%, 与 M-T 检测法的敏感度(62.14%)相比, 敏感度差异仅为 6.21%, 表明修正后的频带幅值检测模型对香梨硬度变化具有较高的检测能力。

表 8 不同硬度检测法的敏感度

Table 8 Sensitivities of different stiffness detection methods

硬度检测方法	M-T 法	频带幅值法	
		修正前检测模型 $S_{M-T}$	修正后检测模型 $S'_{M-T}$
敏感度 ( $P_S$ ) /%	62.14	51.56	58.28

### 3 结论

本文采用压电梁式传感器激励感测获得响应信号, 在香梨同一点重复激励感测, 时域和频域的响应信号稳定; 在 320~880 Hz 波段以 80 Hz 为频带划分间隔, 可提取 8 个频带幅值参数, 每个频带幅值与香梨 M-T 实测硬度的相关性较低, 最高仅为 0.63。通过主成分回归分析方法, 建立了基于 8 个频带幅值参数的香梨硬度检测模型, 该模型校正集和验证集的相关系数分别为 0.77 和 0.66, 均方根误差分别为 1.23 和 1.59, 对香梨硬度的检测敏感度仅为 51.56%, 模型检测性能较低, 稳定性较差。引入质量参数修正后, 模型校正集、验证集的相关系数分别升高到 0.81 和 0.72, 均方根误差分别降低为 1.13 和 1.44, 对硬度检测敏感度升高到 58.28%, 与 M-T 法检测硬度的敏感度差异仅为 6.21%, 模型检测性能和稳定性明显提高, 可以适用于香梨硬度无损检测。

### 参考文献

[1] 林敏娟,王振磊.不同地区库尔勒香梨内在品质的差异[J].山西果树,2007,5:42-43  
LIN Min-juan, WANG Zhen-lei. Study on quality of korla sweet pear in different areas [J]. Shanxi Fruits, 2007, 5: 42-43

[2] 刘玲,李疆,覃伟铭.库尔勒香梨果实石细胞发育及其对果实肉质影响初探[J].西北植物学报,2005,25(10):1965-1968  
LIU Ling, LI Jiang, QIN Wei-ming. Stone cell development and its effects on the sarcocarp of Kuerle fragrant pear [J]. Acta Bot. Boreal-Occident Sin., 2005, 25(10): 1965-1968

[3] 韩东海,王加华.水果内部品质近红外光谱无损检测研究进展[J].中国激光,2008,35(8):1123-1130  
HAN Dong-hai, WANG Jia-hua. Review of nondestructive measurement of fruit quality by means of near infrared spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8): 1123-1130

[4] 吴龙国,何建国,贺晓光,等.高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展[J].激光与红外,2013,43(9):990-996  
WU Long-guo, HE Jian-guo, HE Xiao-guang, et al. Research progress of hyperspectral imaging technology in non-destructive detection of fruit [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 990-996

[5] 洪添胜,李震,吴春胤,等.高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J].农业工程学报,2007,23(11):280-285  
HONG Tian-sheng, LI Zhen, WU Chun-yin, et al. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 280-285

[6] Armstrong P R, Stone M L, Brusewitz G H. Peach firmness determination using two different nondestructive vibrational sensing instruments [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(3): 699-703

[7] Stone M L, Armstrong P R, Chen D D, et al. Peach firmness prediction by multiple location impulse testing [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 115-119

[8] Diezma-Iglesias B, Ruiz-Altisent M, Barreiro P. Detection of internal quality in seedless watermelon by acoustic impulse response [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(2): 221-230

[9] 高冠东,滕桂法,肖珂,等.基于 BMV 特征的西瓜成熟度无损检测方法[J].农业工程学报,2010,26(8):326-330  
GAO Guan-dong, TENG Gui-fa, XIAO Ke, et al. Non-destructive detection method of watermelon maturity based on BMV features [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 326-330

[10] Wen Zhang, Di Cui, Yi-bin Ying. Nondestructive measurement of pear texture by acoustic vibration method [J].

- Postharvest Biology and Technology, 2014, 96: 99-105
- [11] Galili N, Shmulevich I, Benichou N. Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(2): 399-407
- [12] Macrellia E, Romani A, Paganelli R P, et al. Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part I: Theory and development of acoustic techniques [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 487-496
- [13] Macrellia E, Romani A, Paganelli R P, et al. Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part II: Statistical and sorting analysis [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201: 497-503
- [14] 徐虎博,吴杰,王墨鹏,等.库尔勒香梨动态频谱响应特性的研究[J].现代食品科技,2015,31(3):71-76
- XU Hu-bo, WU Jie, WANG Zhao-peng, et al. Characteristics of the dynamic spectral response of Korla pear [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(3): 71-76
- [15] 郭呈全,陈希镇.主成分回归的 SPSS 实现[J].统计与决策,2011,5:157-159
- GUO Cheng-quan, CHEN Xi-zhen. SPSS realization of principal component regression [J]. Statistics and Decision, 2011, 5: 157-159

#