

库尔勒香梨动态频谱响应特性的研究

徐虎博, 吴杰, 王翌鹏, 高永茂, 王志鹏, 赵正强

(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: 为了了解库尔勒香梨的动态频谱特性以实现香梨振动频谱法检测内部品质, 本文对香梨进行脉冲激励测试, 分析不同窗函数对香梨动态响应信号处理的效果, 明确不同激励点、激励力、激励材料及香梨质量、果形和坚实度对其动态频谱响应的影响。结果表明, 在动态信号分析过程中, 采用非对称窗的 exponent 窗函数更适宜于香梨动态信号的截断处理, 所获得的频谱响应信号信噪比高, 信息泄露少; 在香梨赤道区域不同激励点对香梨进行单点激励和感测, 信号稳定性强, 其动态频谱响应也基本一致; 不同激励材料和激励力对香梨响应主频率无显著影响, 当采用橡胶锤头且激励力范围为 9~12 N 时, 获得的动态信号较强, 可获得与第二响应频率的幅值相差较大的响应主频率, 更易于信号分析; 香梨质量、果形和坚实度与响应主频率有较好的线性关系。

关键词: 库尔勒香梨; 脉冲激励; 动态频谱响应; 响应主频率

文章编号: 1673-9078(2015)3-71-76

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.3.013

Characteristics of the Dynamic Spectral Response of Korla Pear

XU Hu-bo, WU Jie, WANG Zhao-peng, GAO Yong-mao, WANG Zhi-peng, ZHAO Zheng-qiang

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

Abstract: In this study, Korla pear was exposed to pulse excitation to determine the characteristics of its dynamic spectral response, and the frequency spectrum method was used to test its internal quality. The effect of different window functions on the dynamic spectral response curve of the pear was analyzed. Further, the influence of different excitation points, excitation forces, excitation materials as well as the mass, shape, and firmness of the fruit on the characteristics of dynamic spectral response of the Korla pear was determined. The results showed that during analysis of the dynamic signal of the pear, the exponential window function was more suitable to truncate the signal since the processed signal had high signal to noise ratio and less information leakage. Signals from a single excitation and dynamic signals from different excitation points on the equatorial region of the Korla pear were studied. The signal stability was strong and the responses of dynamic spectrum were generally consistent. Changes in excitation material and forces had no significant effect on the dominant response frequency. When a rubber head hammer was used and the excitation force was in the range of 9 to 12 N, the dynamic signal was strong. The dominant response frequency that showed a larger difference in terms of amplitude with the second response frequency was obtained, thus the dynamic signal could be analyzed easily. The mass, shape, and firmness of the fruit showed good linear correlation with the dominant response frequency.

Key words: Korla pear; pulse excitation; dynamic spectral response; dominant response frequency

库尔勒香梨(简称香梨)是新疆的特色水果和国家地理标志产品^[1], 以其优异的品质在国内外享有盛誉, 是当地果农创汇增收的主要来源, 已成为当地支柱产业之一^[2-3]。近年来, 香梨种植面积和区域不断扩大, 不同产地香梨的内部品质存在明显差异。即使同一果园的香梨, 由于园艺措施也会导致粗皮果和正常果这一严重的内外部品质差异。此外, 香梨贮藏过程中经常还会出现絮败、黑心病等内部缺陷。正是香梨

收稿日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160335); 新疆兵团博士资金项目(2013BB11); 石河子大学高层次人才科研启动资金项目(RGZX201124)

作者简介: 徐虎博(1990-), 男, 硕士生, 研究方向为农产品品质安全

通讯作者: 吴杰(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向为农产品品质安全

这些内部品质差异和缺陷问题, 使得市场上香梨品质等级参差不齐、以次充好现象严重, 致使香梨优质低价, 市场竞争力不高。因此, 实现香梨的内部品质无损检测和分级以提高香梨的商品价值, 是新疆果品行业亟待解决的问题。

坚实度是评价香梨内部品质的重要指标, 动态频谱响应技术在检测果蔬坚实度上具有优势, 已有大量研究采用该技术进行梨^[4-6]、桃^[7-8]、柑橘^[9]、葡萄^[10]、猕猴桃^[11-12]等水果坚实度的评估。不仅如此, 该技术也可用于果蔬内部缺陷的检测, 因此基于动态频谱特性有助于解决香梨内部品质及缺陷的无损检测难题。

已有研究指出, 对于梨桃等粘弹性材料, 其动态信号采用何种截断处理方式决定了动态频谱响应的可

靠性^[13], 而信号激励与感测位置、激励力、激励材料等激振条件对果实动态信号也有不同程度影响^[7,14]。此外, 果实自身的物性, 如质量、果形及成熟度都是对动态频谱响应有重要影响的因素。因此, 本文主要研究分析动态信号的截断方式、低频振动的外部条件及香梨成熟度、果形、质量对其动态频谱特性的影响, 为明确香梨内部品质与其频谱响应参数的关系提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 试样

库尔勒香梨: 于2013年9月20日采自新疆库尔勒市同一果园, 确保香梨试样无虫害、损伤和畸形, 贮藏于温度为-2~0℃、相对湿度为85%~95%环境中供试。

1.2 主要仪器设备

试验系统设备: LC1305 微型压电加速度传感器、带 LC0505 微型压电石英力传感器的 LC0408T 力锤, 朗斯有限责任公司; DLF-电荷电压四合一放大器、INV306U-5160 智能信号采集处理分析仪、DASP 信号采集与实时分析软件 (V10 工程版), 北京东方振动和噪声研究所。

试样特性测定设备: FT-327 果实硬度计, 意大利 BRUZZI 公司; SPS402F 型电子天平, 上海豪斯仪器有限公司。

1.3 测试条件及参数设置

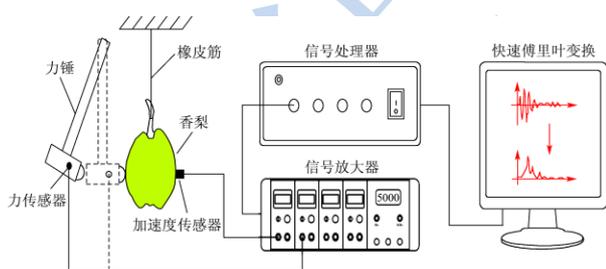


图1 香梨激振测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental excitation system used in this study with the Korla pear

如图1所示, 橡皮筋悬挂香梨以确保其自由振动, 带微型压电石英力传感器的力锤以某一角度摆动敲击香梨, 贴在香梨表面的加速度传感器感测模拟信号, 然后经电荷放大器的信号放大, 最后放大后的信号经抗混滤波、采样保持、模数转换 (A/D) 一系列过程后转变为数字信号。

在数字信号采集过程中, 分析频率设为 2.5 kHz,

采样频率取 6.4 kHz, 采样点数设为 2048, 采样时间为 0.32 s。为了兼顾香梨信号采集的范围和信号处理的精度, 本研究中频率分辨率 Δf 为 6.25 Hz。对时域信号进行截断时, 选择“平均方式”保持最大值, 搜索总有效值最大的波形, 对其进行频谱分析。重叠系数设定为 127/128, 以获得更好的计算结果。图2所示为最后获取的香梨时域和频域曲线。

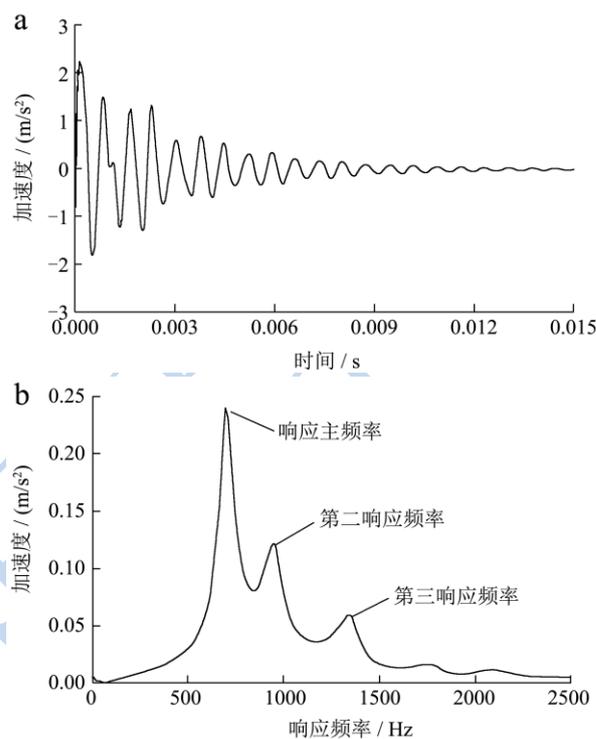


图2 典型时域和频域信号

Fig.2 Typical signal of Korla pear

注: a: 时域信号, b: 频域信号。

1.4 影响因素及水平的确定

如图1所示, 在香梨赤道区域易于振动信号激励和感测, 固定感测点, 在果颊部和赤道线上均匀布置多个激励点, 以测试信号稳定性及不同激励点对香梨动态响应是否有影响。

力锤锤头分别选用聚四氟乙烯、尼龙、铝、钢、橡胶 5 种材料, 激励力选择 5 个水平, 即: 3、6、9、12、15 N, 均不会造成香梨损伤。

试样在 70~160 g 每 5 g 递增分组, 总计取 19 组。采用香梨最大高度与最大直径之比, 即纵横比 q 作为香梨果形指标, 取 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5。在 0~120 h 贮藏时间每隔 12 h 测定香梨坚实度变化, 坚实度测定方法为: 采用水果硬度计将直径 8 mm 的压头以 25.4 mm/min 的速度压入香梨果肉, 穿刺深度为 10 mm。在香梨向阳面与背阴面分别穿刺, 然后取两处实测最大力的平均值作为香梨坚实度。

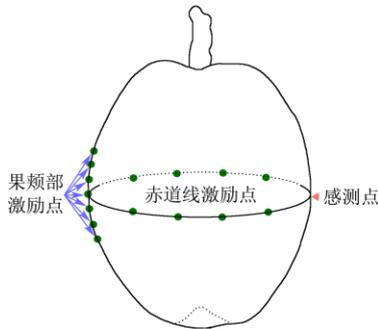


图3 香梨不同激励点及感测点的布置

Fig.3 Layout of different excitation points and sensing points on the Korla pear

2 结果与讨论

2.1 香梨动态频谱信号不同截断方式的比较

为截断无限长的振动信号并改善其频谱分析时信息泄露的问题, 本研究分析了常见的窗函数对同一信号加权处理的效果。

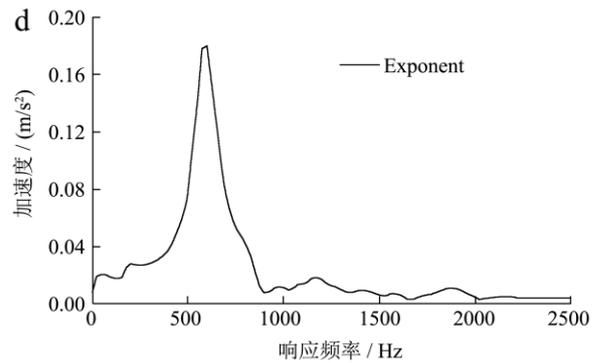
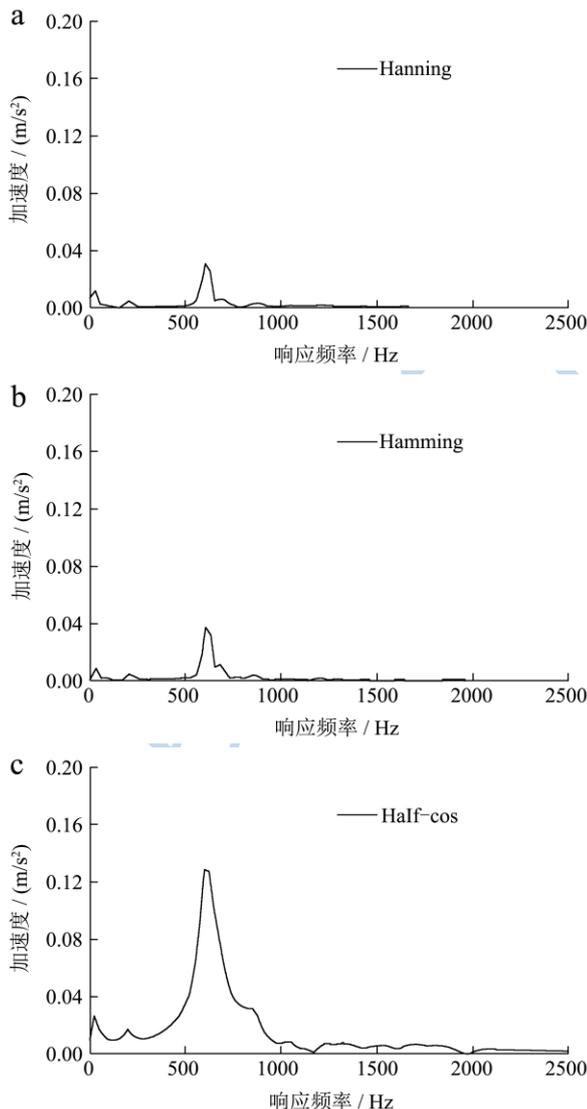


图4 同一时域信号的不同加窗处理

Fig.4 Treatments of different window functions on the same signal

如图4a、b所示, 采用 Hanning 或 Hamming 对称窗函数分别截断处理香梨频谱曲线时, 波形前沿部分的有效信号部分产生严重畸变^[15], 这导致在香梨 0~2 kHz 正常频谱范围内, 1 kHz 之后的频谱失去, 而且响应主频率的幅值亦很低, 因此香梨动态频谱信号不宜采用对称窗函数截断处理。如图4c、d所示, 采用 Half-cos 或 exponent 非对称窗函数分别截断处理时, 由于旁瓣效应减少且保持信号总有效信息最大^[15], 香梨动态频谱信息完整且响应主频率的幅值高, 其中激励力为定值时, exponent 窗函数截断处理的香梨频谱曲线的加速度幅值最高, 比 Half-cos 窗函数处理的信号的信噪比高, 所以本研究适宜采用 exponent 窗函数截断处理动态响应信号。

2.2 香梨动态频谱响应的稳定性

对香梨相同部位单点激励和感测 5 次以测试香梨动态频谱响应的稳定性, 测试结果如图5所示。可以看出, 香梨 5 次激励的动态频谱特性具有较好的一致性, 所得到的响应主频率也基本相同, 这说明该检测系统能够获得稳定的香梨动态频谱响应信号。

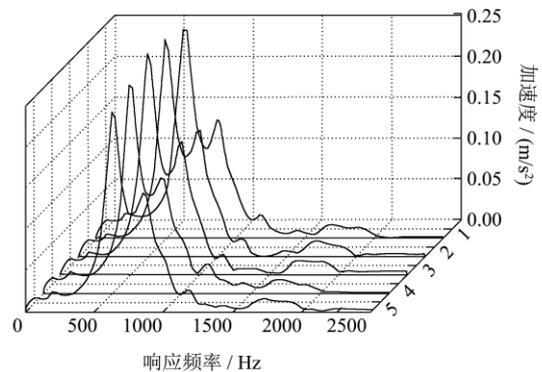


图5 同一激励点重复激励的动态频谱响应曲线

Fig.5 Dynamic spectral response curve from repeat excitations at the same excitation point

2.3 激励条件对香梨动态频谱响应的影响

2.3.1 不同激励点对香梨动态频谱响应的影响

如图6所示, 香梨赤道区不同激励点所获得的动态频谱曲线相似, 考虑到6.25 Hz的频率分辨率, 其对应的响应主频率也基本相同。表1的结果表明, 赤道区不同激励点对香梨响应主频率无显著影响, 这与已有研究一致^[7,14]。但需要指出的是, 本研究响应主频率为675 Hz, 这一结果与本课题组早期研究获得的117.5 Hz响应主频率不同^[14], 这是因为早期研究中香梨未发生自由振动而造成的这一较大差异。

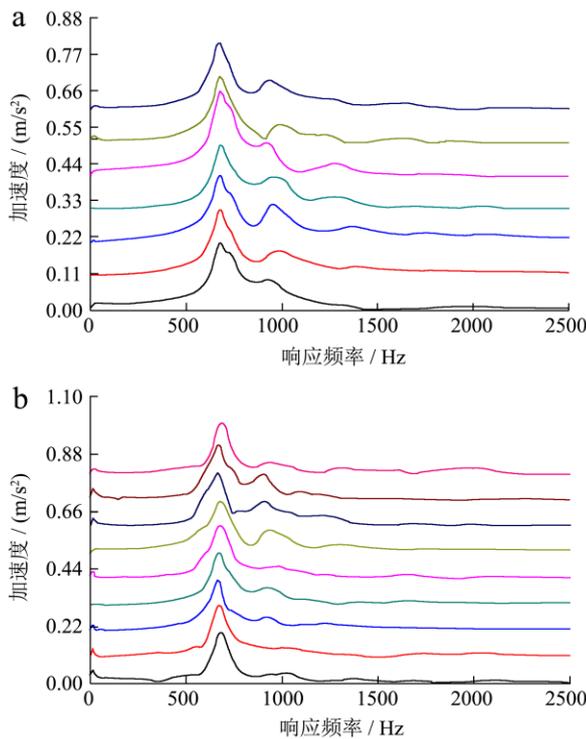


图6 不同激励点对动态频谱响应信号的影响

Fig.6 Effects of different excitation positions on the dynamic spectral response signal

注: 每一个信号幅值平移 0.1 个单位: (a) 果颊部; (b) 赤道线。

2.3.2 激励材料和激励力对香梨动态频谱响应的影响

如图7所示, 不同锤头材料和激励力所对应的响应主频率基本一致, 方差分析的结果也表明(表1), 激励材料和激励力都对香梨响应主频率无显著影响。尽管如此, 采用聚四氟乙烯、尼龙、铝材料锤头激励

时, 香梨动态信号较弱, 所获得的响应主频率与低频部分的频率很接近, 这会导致信号分析困难, 甚至会将低频部分的频率误判为响应主频, 因此不适宜作为香梨激励材料。与之相比, 钢与橡胶两种材料激励出较强的香梨动态信号, 其中橡胶要比钢能更好地激发出香梨的低频特性, 更易获取多阶响应频率, 从而反映香梨品质的信息更为完整。由此说明, 橡胶更适合作为锤头材料激励香梨获得理想的动态频谱曲线。

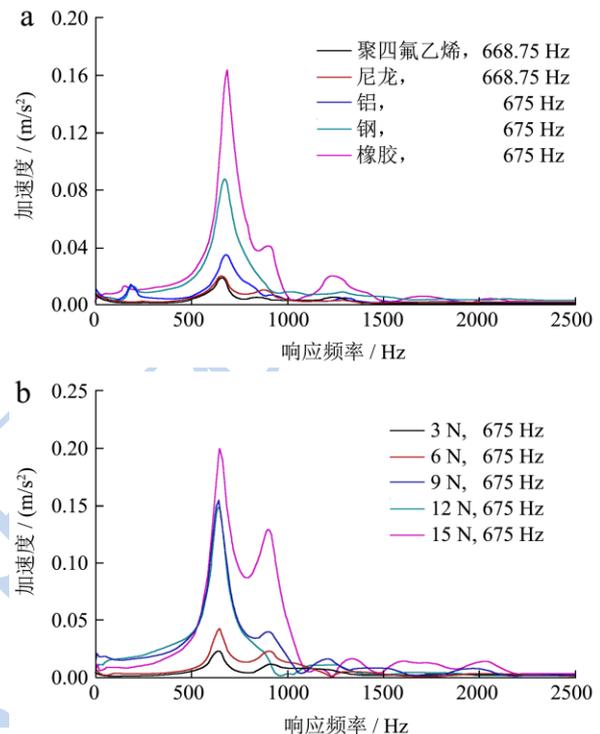


图7 不同激励材料和激励力时的动态频谱响应曲线

Fig.7 Dynamic frequency response curve with different excitation materials and excitation forces

注: a: 激励材料, b: 激励力。

当采用橡胶锤头以不同激励力激励香梨时, 香梨动态响应频谱的幅值随激励力增大而变大。3 N和6 N激励出的香梨动态响应信号都很弱, 而且响应主频率的幅值都与第二响应频率的幅值相差不大, 因此不适合用于香梨动态信号激励。15 N激励出的香梨动态响应信号很强, 然而其响应主频率的幅值与第二响应频率的幅值很接近, 也会给香梨动态信号分析带来困难。因此本研究最佳激励力范围为9~12 N。

表1 不同激励条件对香梨响应主频率影响的显著性水平

Table 1 Significance levels for the effects of different excitation factors on the dominant response frequency of Korla pear

因素水平	激励位置		激励材料					激励力/N				
	果颊部	赤道线	聚四氟乙烯	钢	尼龙	橡胶	铝	3	6	9	12	15
响应主频率/Hz	675.00 ^a	676.39 ^a	675.00 ^a	675.00 ^a	676.25 ^a	675.00 ^a	675.50 ^a	675.00 ^a				

注: 同行不同字母表示差异达5%显著水平。

2.4 香梨物性对动态响应主频率的影响

2.4.1 质量对香梨动态响应主频率的影响

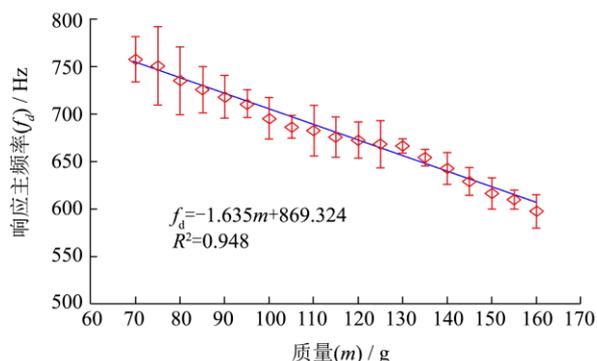


图 8 不同质量对响应主频率的影响

Fig.8 Influence of pear mass on the dominant response frequency

如图 8 所示, 对不同质量香梨 (果形 $q=1.2$, 贮藏时间 0 h) 的响应主频率进行回归分析, 发现响应主频率随香梨质量的减小而逐渐降低, 二者具有较好的线性关系: $f_d = -1.635m + 869.324$, 决定系数 $R^2 = 0.948$ 。

2.4.2 果形对香梨动态响应主频率的影响

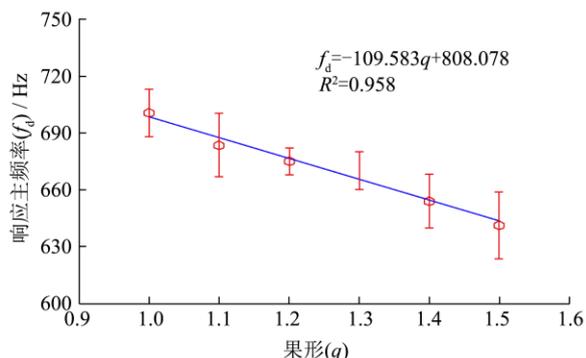


图 9 不同果形对响应主频率的影响

Fig.9 Influence of the pear shape on the dominant response frequency

如图 9 所示, 对不同果形下的香梨 (质量 110 g, 贮藏时间 0 h) 响应主频率进行回归分析, 发现响应主频率随香梨果形 q 的增大而逐渐降低, 二者呈较好的线性关系: $f_d = -109.583q + 808.078$, 决定系数 $R^2 = 0.958$ 。因此, 香梨品质检测过程中果形也是一个不可忽略的影响因素。

2.4.3 坚实度对香梨动态响应主频率的影响

对不同贮藏时间的香梨 (质量 110 g, 果形 $q=1.2$) 进行振动测试和坚实度测量, 如图 10 所示, 响应主频率随香梨坚实度值的增大而逐渐增大, 响应主频率与坚实度的关系为 $f_d = 95.785F_i + 296.016$, 决定系数 $R^2 = 0.885$ 。这充分表明, 响应主频率可用于香梨不同坚实度的评估。

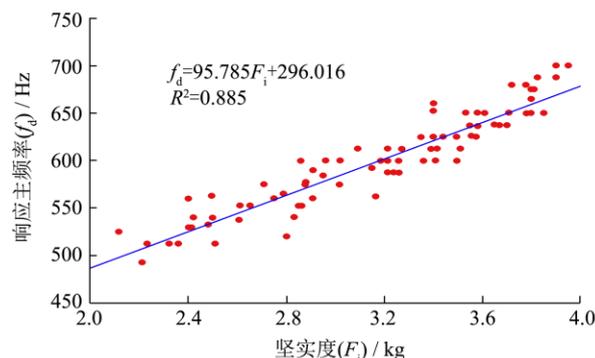


图 10 不同坚实度对响应主频率的影响

Fig.10 Influence of firmness of the fruit on the dominant response frequency

3 结论

3.1 动态信号分析过程中, 采用非对称窗的 exponent 窗函数更适宜于香梨动态信号的截断处理, 所获得的频谱响应信号的信噪比高, 信息泄露少。

3.2 在香梨赤道区域不同激励点对香梨进行激励, 其动态频谱响应基本一致, 信号稳定; 响应主频率不受激励材料和激励力的影响, 但橡胶材料更适宜激励香梨获得信息更为完整的动态频谱曲线, 激励力范围为 9~12 N 时, 动态信号较强, 响应主频率与第二响应频的幅值相差大, 更易于信号分析。

3.3 香梨质量、果形和坚实度与其动态响应主频率有较好的相关性, 因此响应主频率可作为香梨内部品质评估的重要指标量, 并应充分考虑质量和果形对响应主频率的影响。

参考文献

- [1] GB/T 19859-2005, 地理标志产品库尔勒香梨[S]. GB/T 19859-2005, Product of geographical indication-Korla pear [S]
- [2] 乔金玲. 库尔勒香梨产业化发展现状及建议[J]. 新疆农业科技, 2010, 4: 4. QIAO Jin-ling. Suggestions and current situation of industrialization of Korla Pear [J]. Xinjing Agricultural Science and Technology, 2010, 4: 4
- [3] 苏柳云, 李华西, 袁必真. 巴州库尔勒香梨产业发展分析[J]. 山西果树, 2012, 2: 40-43. SU Liu-yun, LI Hua-xi, YUAN Bi-zhen. Analysis of development of industry of Korla pear of Mongolian Autonomous Prefecture of Bayingolin [J]. Shanxi Fruits, 2012, 2: 40-43
- [4] 王俊, 腾斌, 周鸣. 梨敲击激励后产生的动力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 65-68, 64.

- WANG Jun, TENG Bin, ZHOU Ming. Dynamic response of impact forces on pear [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 65-68, 64
- [5] Wang J, Teng B, Yu Y. Pear dynamic characteristics and firmness detection [J]. Eur. Food Res. Technol., 2004, 218(3): 289-294
- [6] Gómez A H, Wang J, Pereira A G. Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 35(2): 209-215
- [7] Wang J, Teng B, Yu Y. The firmness detection by excitation dynamic characteristics for peach [J]. Food Control, 2006, 17(5): 353-358
- [8] Valero C, Crisosto C H, Slaughter D. Relationship between nondestructive firmness measurements and commercially important ripening fruit stages for peaches, nectarines and plums [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 44(3): 248-253
- [9] Gómez A H, Wang J, Pereira A G. Firmness of mandarin at different picking dates [J]. Food Science and Technology International, 2006, 12(4): 273-279
- [10] Masahiro Takahashi, Mitsuru Taniwaki, Naoki Sakurai, et al. Changes in berry firmness of various grape cultivars on vines measured by nondestructive method before and after veraison [J]. J. Japan Soc. Hort. Sci., 2010, 79(4): 377-383
- [11] Enrico Macrelli, Aldo Romani, Rudi P. Paganelli, 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
- [12] Enrico Macrelli, Aldo Romani, Rudi P. Paganelli, 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
- [13] 腾斌. 梨桃撞击频谱特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004
- TENG Bin. Studies on the characteristics of frequency of pear and peach [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004
- [14] 王翠鹏, 吴杰, 葛云, 等. 库尔勒香梨振动频谱特性研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 23-25, 262
- Wang Zhao-peng, Wu Jie, Ge Yun, et al. Study on vibration spectrum characteristics of Korla pear fruit [J]. Food & Machinery, 2012, 28(4): 23-25, 362
- [15] 林明邦, 吴义谦, 金翠芬. 频谱分析中的窗函数[J]. 振动、测试与诊断, 1989, 9(1): 19-27
- LIN Ming-bang, WU Yi-qian, JIN Cui-fen. Window functions of spectrum analysis [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 1989, 9(1): 19-27