

蜜瓜运输共振频率的测定及其对储藏品质的影响

程 旭, 杨晓清*, 董同力嘎

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为避免蜜瓜运输过程中因发生共振现象导致储藏期间品质的下降, 试验通过数据采集与信号分析软件中的加窗函数结合传递函数分析测出蜜瓜的共振频率, 同时测定了共振频率与硬度的变化趋势以及共振频率和低频振动后储藏期间蜜瓜品质的变化。结果表明: 通过加窗函数结合传递函数分析可以将有效信号从杂乱信号中提取, 可稳定检测到蜜瓜的共振频率; 不同硬度区间的蜜瓜可测得不同范围的共振频率, 硬度较高的蜜瓜其共振频率也相对较大, 共振频率与硬度呈极显著正相关, 决定系数 $R^2=0.9132$; 不论共振频率还是低频率使振动后的果品硬度、可溶性固形物均呈下降趋势, 损伤体积率表现为显著上升, 不论低频还是共振频率, 对振后可溶性固形物含量的影响无明显区别, 共振频率下引起的损伤率增大明显高于低频率的情况, 因此共振是引起果品运输损伤的主要原因; 振动后储藏期间可溶性固形物含量和损伤率的变化与储藏时间均存在很高的线性拟合关系, 拟合决定系数大于 0.95, 实际运输中可通过设计采用缓冲包装和适当的运输方式避开共振频率、达到最大程度减小果品品质衰变和预测并延长货架期的目的。采用加窗函数结合传递函数的测定和分析方法也为同类型和其他果品寻求共振频率、在运输过程中避开共振频率点而达到减损目的提供了借鉴和参考, 为相关运输保护措施的建立奠定理论基础。

关键词: 储藏; 果实; 振动; 蜜瓜; 共振频率; 运输

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.042

中图分类号: O324

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-11-0294-06

程 旭, 杨晓清, 董同力嘎. 蜜瓜运输共振频率的测定及其对储藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 294-299. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.042 http://www.tcsae.org

Cheng Xu, Yang Xiaoping, Dong Tongliga. Measurement of transportation resonance frequency and its influence on qualities of muskmelon during storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(11): 294-299. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.042 http://www.tcsae.org

0 引 言

蜜瓜是中国西北地区代表性的优良特色果品。由于该果品属于呼吸跃变型果实, 并具有明显的黏弹性, 储运中果实因承受载荷作用而加快了内部软化及组织细胞的损伤进程, 最终引起果品品质衰变^[1]。新鲜蜜瓜在 7 月下旬至 8 月中旬大量上市, 采摘后运往全国各地。由于较长时间处于低频段运输振动环境中, 加之呼吸跃变的采后生理特性以及自身结构的力学黏弹特性, 加快了蜜瓜采后品质衰变的进程、储藏期损伤程度明显, 货架期缩短^[2]。近年来, 该类果实品质保持和耐储性的问题引起了国内学者越来越多的关注, 但采后运输环节中因发生共振而引起的损伤问题却鲜见报道。共振是随机振动的一种特殊情况, 主要受到阻尼力的作用, 其次与被测物体的形状、质量和硬度有关^[3]。共振对相关机械系统损伤的危害广为人知, 在果品损伤研究领域, 虽然大量研

究报道了振动会造成果品不同程度的损伤, 但共振频率的测定以及如何提高果品运输随机振动分析的准确性未见报道。果品实际运输经历的是随机振动, 模拟实际运输工况的研究更具工程实用价值^[4], 本研究借助于智能数据采集与信号分析记录仪 (DASP)^[5] 软件中的加窗函数和传函分析, 以增强信号中需要的信息, 压制信号中不需要的信息部分, 模拟实际运输工况, 测定蜜瓜运输振动过程中共振频率并提高振动分析的精确度, 目的在于为设计缓冲包装、避开共振点而达到振动减损奠定理论基础。

国内外科技界一直在研究测试各种系统的传递函数。系统的输入和输出分别为 $x(t)$ 、 $y(t)$, 则传递函数定义为输出信号的傅立叶变换 $S_y(f)$ 与输入信号的傅立叶变换 $S_x(f)$ 之比^[6]。加窗函数分析是指对实测数据进行处理时, 需要把信号的观察时间和范围限制在一定的时间或范围内, 取用有限数据, 将信号数据截断的过程就是对其进行加窗函数的操作^[7-8]。在此过程中将会发生频谱混叠、频谱泄漏等问题^[9-10]。试验过程中为了避免频谱泄漏现象的发生, DASP 软件在参数设置上应选择 FFT 分析点数大于 8 192, 重叠系数为 31/32。为尽可能地减少泄漏, 必须对数据进行加窗处理, 加窗形式选择汉宁窗, 以减小频谱泄露产生的误差值, 最大限度地提高处理结果的可信度^[10]。

国外学者 Tadeusz Gudra 等^[11]研究了航空系统中不同

收稿日期: 2014-12-22 修订日期: 2015-05-11

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目 (2013MS1204); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY13078); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD38B01)

作者简介: 程 旭, 女, 内蒙古呼伦贝尔市人, 主要从事农产品及食品加工储运的研究。呼和浩特 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 010018。

Email: 994358601@qq.com

※通信作者: 杨晓清, 女, 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农产品物理特性及加工储运和植物资源再利用的研究。呼和浩特 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 010018。Email: yxqnmng@163.com

传递函数与脉冲波形的关系; Djordje Babic 等^[12]进一步指出加窗函数在脉冲振动中具有信号采集的重现性以及有效的过滤性能和时域、频域设计性能。国内学者李国鸿等^[13]研究了加窗修正系数在振动信号频谱中可实现减小时域和频域的失真度、大幅度提高振动激励信号的准确性; 王述成等^[14]将汉宁窗作为加窗函数应用于实际随机振动系统, 提高了系统的频谱控制精度与控制分析效果; 武新峰等^[15]基于有限元分析分别从时域和频域讨论了传递函数建模理论, 提高了在振动模型建立过程中的作用。

本试验鉴于果品实际运输过程中的振动为随机振动, 在分析前人振动分析方法的基础上, 以蜜瓜为对象, 应用传函分析结合加窗函数在实际扫频过程中检测蜜瓜在运输振动过程中的共振频率, 为测定果品运输振动的共振频率寻求一种新方法, 有利于运输中避开共振频率有效减损, 同时建立不同成熟度蜜瓜与共振频率的相关性和贮藏期间蜜瓜品质的变化趋势, 为设计缓冲包装、减少因运输振动导致的品质衰变和延长货架期奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验样品

蜜瓜, 产地内蒙古巴彦淖尔市, 属于非网纹状厚皮蜜瓜品种, 集中在 7—8 月份采摘。选择单果质量 1.0~1.2 kg, 无病虫害、无损伤。将其编号, 整果振动试验。

1.2 仪器与设备

SW-TFA 电磁振动试验机(深圳市盛世威试验设备工厂); DASP 智能数据采集与信号分析记录仪(北京东方振动和噪声技术研究所); GY-1 型果实硬度计(杭州托普仪器有限公司); 手持糖度仪(郑州南北仪器设备有限公司)。

1.3 试验设计方法

1.3.1 蜜瓜果实硬度的测定

果实硬度也指果实的坚实度, 其数值可表明果实不同程度的成熟度^[16-17], 是指某单位水果面积承受测力弹簧的压力。单果测量时将蜜瓜沿赤道一周距离外果皮 5 mm 处不同部位均匀测量 10 个点, 取所测平均值作为该蜜瓜果实的硬度值, 以 10^5Pa 表示。分别测量对照组与测试组里每个蜜瓜的硬度, 作记录。

1.3.2 蜜瓜果实可溶性固形物含量的测定

将蜜瓜果实沿赤道部位切开, 在不同部位和深度进行取样, 放入研钵捣碎, 用滴管将蜜瓜果汁放在手持糖度仪的折光棱镜表面, 合上进光盖板。测量时将仪器进光部分上倾 30° 角, 对向光线明亮处, 使刻度线相对清晰, 此时明暗分界线所处的刻度值即所测蜜瓜的可溶性固形物含量(soluble solid content, SSC) 测量后应用蒸馏水冲洗折光棱镜。同时测定 SSC 时要记录室温, 以便进行调整。为减小因试验数据的误差, 单果测定同一深度与部位测定时重复试验 5 次, 取其算术平均值作为最佳数据。

1.3.3 蜜瓜损伤体积率的测定

果实损伤程度根据果肉瘀伤体积或面积度量, 一般

依据 Mohsenin 或 Schoorl 提出的椭圆厚度计算法, 考虑到蜜瓜果实外部形状和内部结构, 故损伤体积率(damage volume rate, DVR) 采用球体体积差值法计算^[18-20]。

1.3.4 DASP 软件的使用

DASP 软件使用过程中设置 2 个通道传感器, 其中 1 通道连接于振动台, 用于测量振动输入值, 2 通道粘接于蜜瓜样品表面, 用于测量蜜瓜整果的振动响应。将振动时用于粘结蜜瓜的传感器芯片顺着振动的方向放置, 将解析后得到果实上的振动加速度与振动台同方向加速度的比值定义为加速度传递率(acceleration transferring rate, ATR)。

1.3.5 扫频过程中参数的设置

试验采用线性扫频^[21]的方法, 在实际运输的过程中, 根据 ASTM D999 的规定, 实际运输频率通常在低频范围内, 同时参照 GB/T 4857.23—2003 公路运输随机振动功率谱密度数据, 考虑到实际运输过程中载质量 4 t 卡车运输频率为 8~50 Hz, 而空载时运输频率则为 10~100 Hz, 结合振动台情况, 将扫频频率设置为 12~80 Hz。扫频时, 将选出 10 个相同硬度的蜜瓜依次整果固定在振动台上, 每次固定 1 个, 每个扫频一次共扫频 10 次, 分别记录结果得出其共振频率。

1.3.6 硬度对共振频率的影响试验

采样时挑选质量、硬度相近的蜜瓜, 测试过程中将同一批蜜瓜进行抽样测试硬度, 将其记为第 1 硬度组; 同时采样的其余蜜瓜分别放置 3 和 5 d 使其后熟, 后测试, 分别记为第 2、3 硬度组。

1.3.7 振动对贮藏品质的影响试验

疲劳振动和低频率振动是造成果品损伤的主要原因^[22-23], 通过调查多种果蔬公路运输可知, 50~70 km/h 时速、公路运输的振动频率为 1.0~5.0 Hz, 参考潘俨等人经调查柑橘运输损伤的主要振动频率为 2.0~5.0 Hz^[23]并结合蜜瓜自身果皮厚皮的特点, 因此选取 4、6 Hz 的低频率以及共振频率分别振动 15 和 25 min, 考察蜜瓜经过低频与共振频率、不同时间振动后储藏 20 d 期间品质的变化。

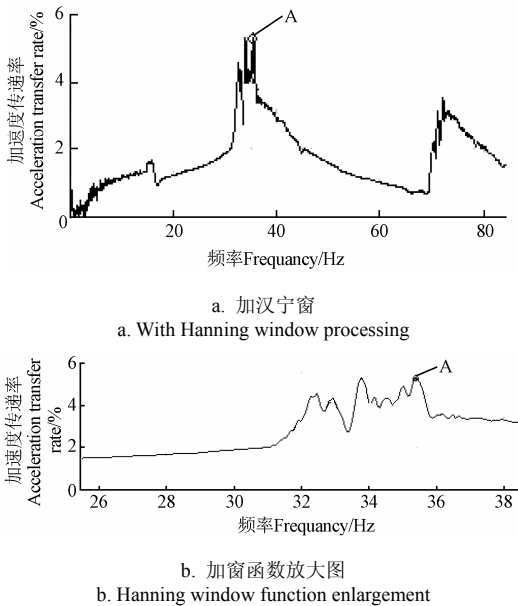
2 结果与分析

2.1 扫频及共振频率

在实际振动过程中, 因作用于果实上的应力不易于直接测定与表征, 同时应力与振动加速度高度相关, 为此应力采用与外界相关联的振动加速度来表征^[22]。用加速度传感器测定待测物的加速度幅值, 使用智能数据采集与信号分析记录仪 DASP 软件中的加窗函数结合传递函数分析得出蜜瓜的共振频率。当其加速度幅值达到最大时所对应的频率就是蜜瓜的共振频率。扫频过程中, 各供试样品的试验条件完全相同。整个试验过程中, 振动台与蜜瓜果实上的激励信号变化稳定。

试验过程中从 30 Hz 开始能明显感觉到振动台频率加快, 38 Hz 左右此现象消失, 振动台恢复正常频率状态。实际扫频过程中, 扫频区间不断伴有杂峰出现, 直接观察不易发现共振频率。因此使用加窗函数结合传

函数分析,其目的可以防止频谱泄露,从杂乱的信号中提取有效信号分析,准确得出蜜瓜的共振频率。将测试的结果进行加汉宁窗函数和不使用任何加窗函数的处理,结果见图1。



注: A所指加速度传递率最大值,为5.31059,对应频率 $f=35.38$ Hz。
Note: A is the maximum of acceleration transfer rate of 5.31059, corresponding with $f=35.38$ Hz.

图1 加汉宁窗和未加窗函数的扫频振动

Fig.1 Scanning frequency vibration with Hanning window processing

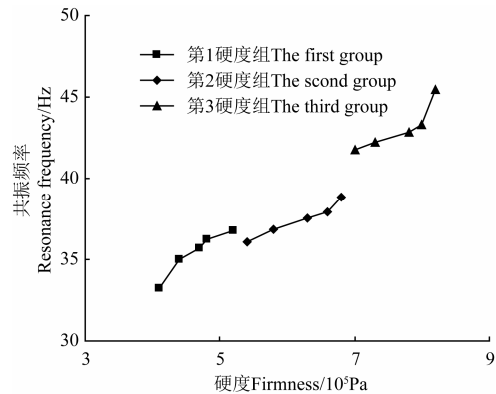
图1a使用加汉宁窗结合传函分析得出的从DASP软件截取的共振频率原图,图1b则将得出的共振频率部分进行放大处理。图中横坐标为频率,纵坐标为加速度传递率。如图1a所示,当扫频频率为12~80 Hz时,经过加窗函数结合传函分析方法反复验证可明显重复再现出样品蜜瓜共振频率为35.38 Hz;图1b所示,在33.8和35.38 Hz处都会出现峰值,由此可知,使用DASP软件的传函分析法得到的共振频率图会发生峰值偏移的现象,此时的幅值能量所对应的频率也会发生偏移,导致试验结果的失真性。但当使用传函分析结合汉宁窗时,则避免了峰值的偏移,能量幅值 $H=5.31$ 始终重复稳定于一个峰值上,该峰值点A对应的频率即为样品的共振频率35.38 Hz。如果不使用汉宁窗而人为调试幅值坐标轴于35.38 Hz频率点上,此时显示的能量幅值是 $H=5.26$,而不是能量幅值的最高点5.31,因而充分说明了不经过加窗函数时蜜瓜的共振频率能量幅值会发生频谱泄露,使用传函分析并结合汉宁窗则提供了共振频率测试的准确性和重复再现性。

振动过程中,蜜瓜的共振频率易受外界因素影响,如振动台,传感器或人为因素而导致蜜瓜果品上的加速度幅值出现波动现象。而图1a显示的加窗函数结合传函分析方法能有效过滤掉扫频区间不断出现的杂峰,在反复测试中能明显突出显示出共振频率,信号采集有明显的重现性,同时与不加窗相比,避免了频谱泄露,减少了振动信号频域的失真度,提高了振动分析的准确性,

这与Djordje Babic^[12]和王述成等^[14]学者的结论是一致的。

2.2 硬度对共振频率的影响

果实硬度不同往往反映出成熟度不同,其相关力学特性和载荷后的机械损伤也不同,共振频率与硬度,质量及物品本身的外观形状有关^[20]。测定共振频率与硬度的关系,为在实际运输过程中针对蜜瓜果实自身的情况获得不同批次成熟度条件下的共振频率、进一步采用相应的包装措施,达到减损和节能的目的。试验结果见图2。



注: 3个硬度组的放置时间分别为0、3、5 d。

Note: Different hardnesses of the three group was stored for 0, 3, 5 d.

图2 不同硬度值下单果蜜瓜共振频率的变化

Fig.2 Changes of resonance frequency at different firmnesses

图2为不同硬度下共振频率的变化趋势,3个硬度值分别为 $(7\sim 8.2)\times 10^5$ 、 $(5.4\sim 6.8)\times 10^5$ 和 $(4.1\sim 5.2)\times 10^5$ Pa,以相同振动测试条件测得果实共振频率范围分别为41.8~45.5、36.2~38.87和33.25~36.8 Hz。硬度较高的蜜瓜其共振频率也相对较大。在质量和外观形状大致相同的测试条件下,蜜瓜的共振频率与硬度表现为极显著正相关,相关系数 $R^2=0.9132$ 。相关性见图3。

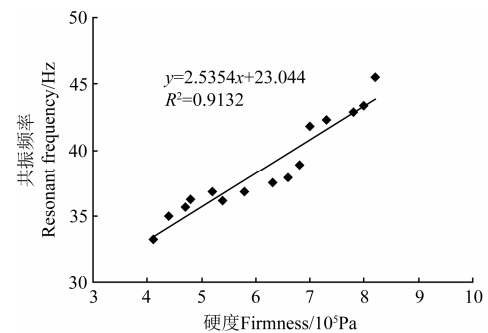
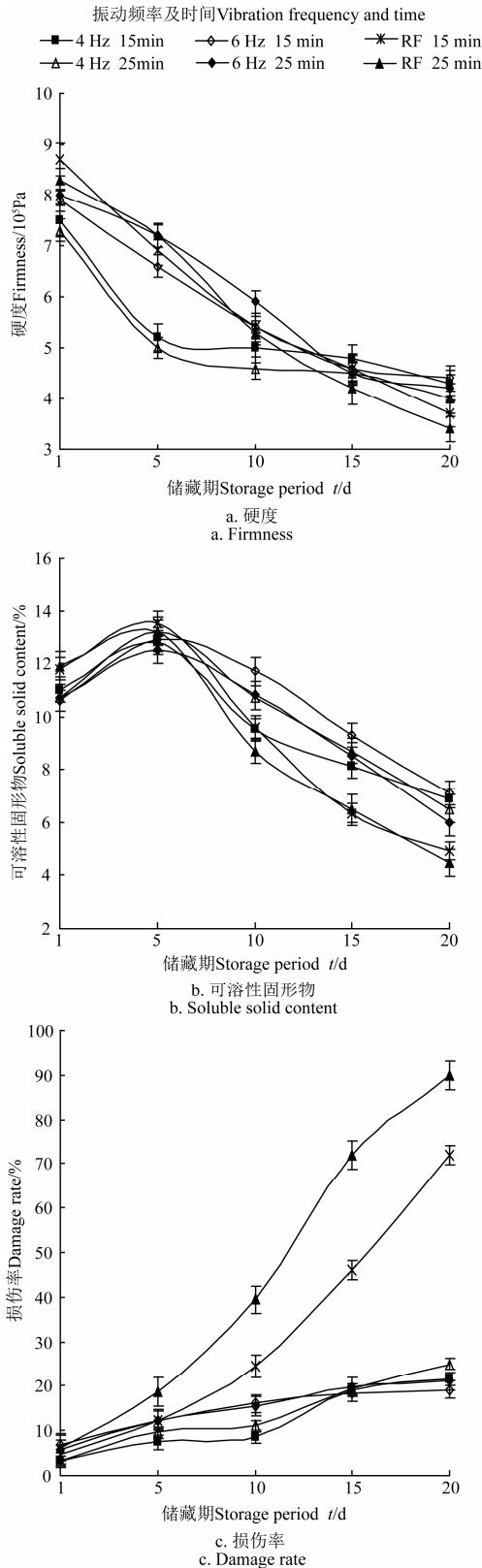


图3 共振频率与蜜瓜硬度的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between resonance frequency and hardness

2.3 振动后贮藏品质变化验证及预测

由图4a可知,振动台上的加速度幅值稳定的情况下,振动15和25 min的蜜瓜在储藏期间的硬度均呈下降趋势,储藏前期低频下硬度下降较快,储藏期达到15 d时,共振频率下明显要比低频下硬度下降快,而2个低频的情况无明显差异。



注：RF 为共振频率。下同。
Note: RF refers to resonance frequency with the same as below.
图 4 不同振动时长后储藏期间蜜瓜硬度和可溶性固形物含量 SSC 的变化

Fig.4 Firmness and soluble solid content changes of muskmelons during storage after vibration under resonance frequency

由图 4b 可知,振动台上的加速度幅值稳定的情况下,振动 15 和 25 min 的蜜瓜在储藏期间的可溶性固形物含量

呈先升高后下降趋势,这可能因为蜜瓜属于典型的呼吸跃变型果品,在振后的初期阶段,果实内部组织受到振动载荷的刺激,加剧了果实的呼吸与后熟过程,在短时间内出现呼吸高峰,也激发了果胶物质的降解,因此表现可溶性固形物含量出现增大的现象;待果实内部组织经过了稳定缓冲和平衡过程后,果实呼吸强度下降,固形物含量在图 4c 中表现为从第 5 天开始呈下降趋势。不论是 4 和 6 Hz 的低频还是共振频率,对振后可溶性固形物含量的影响区别不明显。

由图 4c 可知,振动台上的加速度幅值稳定的情况下,振动 15 和 25 min 的蜜瓜在储藏期间的损伤体积率表现为极显著上升。储藏期达到 20 d 时,共振频率下蜜瓜的损伤体积率分别达到了 72%和 90%,而低频率振后的 DVR 变化总体上明显低于共振频率引起的变化,其中 4 与 6 Hz 相比,引起损伤率变化的幅度在储藏后期表现较为明显。因此采后运输中共振频率是造成损伤的主要原因,运输中应设法避开共振频率,最大程度减少运输过程中果品品质的损伤。

表 1 所示为低频和共振频率不同时长品质变化与储藏时间的拟合关系。表 1 拟合结果表明,不论低频还是共振频率,振动后储藏期间固形物含量和损伤率的变化与储藏时间均存在很高的线性拟合关系,较长时间振动后拟合系数 R^2 均大于 0.95,同时也进一步验证了共振频率下储藏期果品品质衰变速率明显高于低频率。因此寻求获得蜜瓜类果品的共振频率,在实际运输中采用缓冲包装和适当的运输方式而避开共振频率,达到最大程度减小果品品质衰变和延长货架期的目的。

表 1 振动后储藏期间蜜瓜品质变化的预测

品质指标 Quality index	振动 15 min Vibration for 15 min		振动 25 min Vibration for 25 min	
	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
4 Hz 硬度 4 Hz Hardness	$y=-0.68x+7.4$	0.7492	$y=-0.71x+7.21$	0.7560
共振频率硬度 Resonant frequency	$y=-1.23x+9.55$	0.9691	$y=-1.28x+9.52$	0.9806
4 Hz 可溶性固形物 SSC 4 Hz soluble solid content%	$y=-1.91x+14.1$	0.9360	$y=-2.21x+15.3$	0.9981
共振频率 SSC Resonant frequency SSC/%	$y=-2.91x+15.85$	0.9626	$y=-2.845x+15.325$	0.9590
4Hz 损伤率 4 Hz damage rate	$y=4.8x-2.38$	0.9322	$y=5.29x-2.25$	0.9682
共振频率损伤率 Resonant frequency and damage rate	$y=16.83x-18.59$	0.9487	$y=22.08x-20.98$	0.9798

注：鉴于振动后果品物质内部组织存在呼吸跃变的过程,拟合过程从振后第 5 天开始。
Note: The fitting point starts from the fifth day of storage due to stable respiration and balance process inside fruits after vibration.

3 结论

1) 模拟道路运输工况,设置一定区间的扫频频率,

使用 DASP 软件分析中的加窗函数结合传函分析可以有效防止频谱泄露, 从杂乱的信号中提取有效信号, 进行准确分析后得出样品蜜瓜的共振频率为 35.38 Hz;

2) 影响共振频率的因素有形状、质量和硬度, 根据成熟度情况将蜜瓜分为不同 $(7\sim 8.2)\times 10^5$ 、 $(5.4\sim 6.8)\times 10^5$ 和 $(4.1\sim 5.2)\times 10^5\text{Pa}$ 3 个硬度组, 以相同振动测试条件测得果实共振频率范围分别为 41.8~45.5、36.2~38.87 和 33.25~36.8Hz。共振频率与硬度表现为极显著正相关, 相关系数 $R^2=0.9132$ 。

3) 储藏期间蜜瓜的品质随不同振动时间和振动频率的变化而变化。观察振动后下储藏期间蜜瓜的品质变化得出, 不论共振频率还是低频率振动后的果品硬度、可溶性固形物均呈下降趋势, 损伤体积率表现为显著上升; 不论是低频还是共振频率, 对振后可溶性固形物含量的影响区别不明显, 且共振频率下引起的损伤率增大明显高于低频率的情况, 因此, 共振是引起果品运输损伤的主要原因; 振动后储藏期间固形物含量和损伤率的变化与储藏时间均存在很高的线性拟合关系, 拟合系数大于 0.95, 实际运输中可通过采用适当的包装和运输方式避开共振频率, 达到最大程度减小果品品质衰变和预测并延长货架期的目的。

[参 考 文 献]

- [1] 杨晓清, 王春光. 河套蜜瓜机械特性与静载损伤关系的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 31-37.
Yang Xiaoqing, Wang Chunguang. Relationship between mechanical properties and damage of Hetao muskmelons under static compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 31-37. (in Chinese with English abstract)
- [2] 周然, 谢晶. 运输过程中哈密瓜品质的影响因素及其解决方案研究[C]//上海市制冷学会.上海市制冷学会 2013 年学术年会论文集.上海市制冷学会, 2013: 5.
Zhou Ran, Xie Jing. The study on the adversity factors affecting the qualities of Hami melon during transport and its resolving projects[C]//Shanghai City Institute of refrigeration.Shanghai Institute of refrigeration Symposium 2013 in Shanghai Institute of refrigeration, 2013: 5. (in Chinese with English abstract)
- [3] 苏晓琴, 姜其畅, 苏艳丽. 共振的研究及应用[J]. 运城学院学报, 2011, 29(2): 24-29.
Su Xiaoqin, Jiang Qichang, Su Yanli. The research and application about resonance[J]. Journal of Yuncheng University, 2011, 29(2): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [4] 卢立新, 黄祥飞, 华岩. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110-114.
Lu Lixin, Huang Xiangfei, Huayan. Effect of Packing methods on vibration bruising of pear fruits by simulated transport test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 110-114. (in Chinese with English abstract)
- [5] 舜子, 程俐. 中国虚拟仪器库 DASP 达到国际领先水平——记中国虚拟仪器的创始人和奠基者应怀樵教授[C]//中国振动工程学会. 现代振动与噪声技术(第九卷). 中国振动工程学会, 2011: 6.
Shun Zi, Cheng Li. Virtual instrument library DASP reached the international advanced level in china. China's virtual instrument's founder and founder of Ying Huaiqiao professor[C]// Chinese society of vibration engineering. The vibration and noise of modern technology (Ninth volumes).Vibration Engineering Society of China, 2011: 6. (in Chinese with English abstract)
- [6] 应怀樵, 沈松, 刘进明, 等. 传递函数的测试及实时控制和反演[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 9(3): 201-205.
Ying Huaiqiao, Shen Song, Liu Jinming et al. Transfer function measurement an real-time control and reversion[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2011, 9(3): 201-205. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨阳. 窗函数特性及加窗插值 FFT 算法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
Yang Yang. Research on Characteristics of Window Functions and the Window and Interpolated FFT Algorithms[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [8] Yu Cao, CheeYong Chan, JieLi. Optimization of Analytic Window Functions[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2012, 5(11): 1244-1256.
- [9] 林青松, 陈清华. 谐波检测中频谱泄漏问题的研究[J]. 工矿自动化, 2010(2): 53-56.
Lin Qingsong, Chen Qinghua. Research of top coal caring and drawing characteristics of think seam based on discrete element[J]. Industrial Automation, 2010(2): 53-56. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kui Fuchen, Shu Li Mei. Composite Interpolated Fast Fourier Transform With the Hanning Window[J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(6): 1571-1575.
- [11] Tadeusz Gudra, Krzysztof J. Opieliński. Influence of acoustic impedance of multilayer acoustic systems on the transfer function of ultrasonic airborne transducers[J]. Ultrasonics, 2002, 40(11): 457-463.
- [12] Djordje Babic. Windowing design method for polynomial-based interpolation filters[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2013, 32(2): 759-780.
- [13] 李国鸿, 赵述元, 陈钊. 振动信号频谱分析中的加窗及加窗幅值修正[J]. 测控技术, 2012, 31(6): 34-37, 41.
Li Guohong, Zhao Shuyuan, Chen Zhao. Windowing and amplitude correction of vibration signal in spectrum analysis[J]. Measurement and Control Technology, 2012, 31(6): 34-37, 41. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王述成, 陈章位. 随机振动试验中时域随机化技术的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 230-233.
Wang Shucheng, Chen Zhangwei. Research on the randomization of random test in vibration control system[J]. Transactions of the Chinese Society of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 230-233. (in Chinese with English abstract)
- [15] 武新峰, 雷勇军, 李家文. 基于有限元分析的复杂结构弹性振动传递函数建模[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 57-61, 77.
Wu Xinfeng, Lei Yongjun, Li Jiawen. Transfer function modeling for elastic vibration of complicated structures based on finite element analysis[J]. Vibration and Shock, 2012, 31(11): 57-61, 77. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨晓清, 王春光. 河套蜜瓜静载蠕变特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 202-207.
Yang Xiaoqing, Wang Chunguang. Creep properties of Hetao muskmelon under static loading[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 202-207. (in Chinese with English abstract)
- [17] Oveisi Z, Minaei S, Rafiee S, et al . Application of vibration response technique for the firmness evaluation of pear fruit during storage[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(11): 3261-3268.
- [18] Abbaszadeha R, Rajabipourb A, Ahmadib H, et al. Prediction of watermelon quality based on vibration spectrum[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 13(7): 291-293.

- [19] Mohsenin N N, Jindal V K, Manor A N. Mechanics of impact of a falling fruit on a cushioned surface[J]. *Transaction of the ASAE*, 1978, 34(3): 594—600.
- [20] School D, Holt J E. Bruise resistance measurements in apples[J]. *J Texture Stud*, 1980, 11(4): 389—394.
- [21] 林英. 线性调频信号调制解调性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Lin Ying. Research on Signal Modulation and Demodulation Performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [22] 卢立新, 周德志. 基于疲劳损伤理论的果品振动损伤模型表征[J]. *农业工程学报*, 2005, 25(11): 341—344.
- Lu Lixin, Zhou Dezhi. Model for vibration-cumulative bruising of fruit based on fatigue damage theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2005, 25(11): 341—344. (in Chinese with English abstract)
- [23] 潘伊, 王英, 车凤斌, 等. 鲜杏不同堆高运输的三维轴向振动加速度差异[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(2): 222—228.
Pan Yan, Wang Ying, Che Fengbin, et al. Difference of vibration acceleration on 3 axial different stacking heights in fresh apricot transport[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(2): 222—228. (in Chinese with English abstract)

Measurement of transportation resonance frequency and its influence on qualities of muskmelon during storage

Cheng Xu, Yang Xiaoqing^{*}, Dong Tongliga

(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: Muskmelons, a typical fruit with excellent flavor produced in northwest of China, are always harvested from late July to mid-August. At time of harvest, it floods the local market. Transportation and circulation of the muskmelon outside the area are common and trucks are the most usual and important tools for the product transportation and distribution. However, the fruits are easily injured during the transportation because they contain high percentage of water in their fresh forms and are continuing to ripen during transportation resulting from their physiological function through post-harvest respiration. Injure of fruits caused by vibration during long distance transportation manifest typically itself in two aspects. One lies in acceleration due to vibration caused by repeated low-stress fatigue damage, the other is the vibration at resonant frequency, which is a special case in the random vibration. Resonant frequency is mainly affected by the damping force, followed with the object shape, mass and firmness and widely known to be harmful in most mechanical systems but few reports have been published about its harmfulness in fruits transportation. In addition, how to measure the resonant frequency and to further improve the accuracy of random vibration analysis of fruits transportation have not been reported. This study was to investigate the resonant frequency and to improve the accuracy of random vibration analysis in the vibration process through simulating actual transportation situation by the use of both window function and transferring analysis on the platform of DASP software, which enhanced useful information in signals and weaken those useless ones. The window functions essentially referred to limit the scope of signal and observation time, and data must be windowed in order to minimize spectrum leakage. To maximize the credibility of the data processing results and minimize errors due to spectrum leakage, Hanning window of DASP software was used in the test with the number of analysis points greater than 8 192 and overlapping coefficient 31/32. Resonant frequency of sample, which can be detected repeatedly through Hanning window functions, was the one when the maximum acceleration transferring rate was achieved during the whole sweep frequency process with a value of 35.38 Hz. Meanwhile, resonant frequencies of different ripeness groups of muskmelons with firmness of $(7-8.2) \times 10^5$, $(5.4-6.8) \times 10^5$ and $(4.1-5.2) \times 10^5$ Pa were achieved respectively with the value of 41.8-45.5, 36.2-38.87 and 33.25-36.8 Hz, showing significant positive correlation between resonant frequency and firmness of muskmelons with a correlation coefficient 0.9132. The study of the impact of both resonant frequency vibration and low frequency vibration on the qualities, such as firmness, soluble solid content (SSC) and damage volume rate (DVR), was carried out as well as the prediction model during storage. The low frequencies of 4 and 6 Hz were adopted in the test according to survey of truck transportation profiles combining with characteristics of muskmelons at the speed of 50-70 km/h in northwest of China. Methods were respectively used to determine the firmness, SSC and DVR. The results showed that the qualities of muskmelons always deteriorated during storage after vibration with prolonging vibration time under any vibration frequency. As both the firmness and SSC decreased, the DVR sharply increased. In addition, the DVR caused by vibration of resonant frequency was obviously greater than that of low frequency in the condition of long lasting time. Multiple linear regression models using storage time and quality parameters obtained showed better correlation ($R^2 > 0.95$). This study demonstrated the feasibility of detecting the resonant frequency during fruits transportation vibration using window functions and of predicting shelf life of muskmelons postharvest, and also provides basic foundation for appropriate package avoiding resonant frequency in real transportation conditions.

Key words: storage; fruits; vibration; muskmelon; resonant frequency; transportation