

哈密瓜物流包装垂直和水平振动的建模分析与防护

Modeling analysis and protection study of vertical and horizontal vibrations in Hami melon logistics packages

张连文^{1,2} 谢晓定¹ 武玉柱² 张超² 高钾² 徐斌³

ZHANG Lianwen^{1,2} XIE Xiaoding¹ WU Yuzhu² ZHANG Chao² GAO Jia² XU Bin³

(1. 天津商业大学, 天津 300134; 2. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023;

3. 新疆农业科学院, 新疆 乌鲁木齐 830091)

(1. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830023, China; 3. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China)

摘要:目的:优化缓冲包装设计。方法:以哈密瓜及其包装为研究对象,对5层堆码包装进行扫频振动试验,测出各层包装在垂直和水平方向振动的固有频率、最大功率谱密度、峰值加速度,并建立最大功率谱密度、峰值加速度与堆码层关系模型。结果:越往上层的包装,其在垂直和水平方向振动的最大功率谱密度和峰值加速度越大;同一层包装在垂直方向上的最大功率谱密度和峰值加速度大于水平方向上的;最大功率谱密度和峰值加速度与堆码层存在极显著正相关。结论:进行缓冲包装优化设计时,越往上层的包装其缓冲性能设计要越好;相比于水平方向,垂直方向的缓冲性能需要更好;该回归模型能较准确预测各层包装的振动情况。

关键词:哈密瓜;物流振动试验;固有频率;最大功率谱密度;峰值加速度;建模分析

Abstract: Objective: Optimized cushioning packaging. **Methods:** Taking Hami melon and its packaging as the research object, conducted sweep frequency vibration test on 5-layer stacked packaging, measured the natural frequency, maximum power Spectral density and peak acceleration of the vertical and horizontal vibration of each layer of packaging, and established the relational model between the maximum power spectral density, peak acceleration and stacking layer. **Results:** The higher the packaging, the larger the maximum power spectral density and peak acceleration in both vertical and horizontal directions.

The maximum power spectral density and peak acceleration in the vertical direction of the same layer of packaging were greater than those in the horizontal direction. The maximum power spectral density and peak acceleration were strongly positively correlated with the stacking layers. **Conclusion:** When conducting buffer packaging optimization design, the higher level of packaging requires better buffering performance; compared to the horizontal direction, the vertical direction requires better buffering performance; This regression model can accurately predict the vibration situation of each layer of packaging.

Keywords: Hami melon; logistics vibration experiments; inherent frequency; maximum power spectral density; peak acceleration; modeling analysis

作为新疆重要的农业经济作物之一,哈密瓜因香甜脆嫩、营养丰富等优点,深受消费者喜爱^[1-2]。为满足内地消费者对哈密瓜的需求,需将哈密瓜通过卡车长途运输至广东、上海、浙江、北京等主要分销地^[3]。但长途运输振动,不仅会对哈密瓜的外观造成机械损伤,还会加速其内部品质劣变,因此,研究卡车长途运输振动具有重要意义^[4-5]。

近年来,国内外学者致力于研究运输振动对瓜果品质的损伤机理,并寻找降低振动引起的损伤的方法^[6-7]。目前,研究运输振动对瓜果品质的影响主要通过模拟运输随机振动、定频振动、扫频振动3种试验手段^[8]。夏铭等^[9-11]通过模拟运输随机振动试验,研究了不同类型的减振衬垫、托盘、缓冲泡沫对水果的防护效果;曾媛媛等^[12-15]通过模拟运输定频振动试验,研究了不同振动频率对哈密瓜硬度、总酚含量、细胞膜脂、弹性和咀嚼性等品质指标的影响,发现低频振动对哈密瓜品质的影响更

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31960490);天津市研究生科研创新项目(编号:2022SKYZ079)

作者简介:张连文(1965—),男,天津商业大学教授,博士。

E-mail: 623147349@qq.com

收稿日期:2022-11-19 **改回日期:**2023-09-15

大。张连文等^[16-17]通过模拟运输扫频振动试验,测定了瓦楞纸箱及瓜果的固有频率。上述研究大多集中在对单果或单层包装件在单一垂直方向振动及其损伤,而在实际公路运输过程中,包装件通常以逐层码放的方式装载在卡车厢内,并且行驶中由于受路况、气候条件、行驶速度等因素的影响,卡车往往会同时产生垂直和水平方向振动的现象,因此,研究多层堆码包装件在垂直和水平方向的振动特性更具实际参考价值。

试验拟以西州蜜 17 号哈密瓜和 0201 型包装瓦楞纸箱为研究对象,模拟长途卡车在高速公路行驶的实际运输振动,分析采集到的振动信号,试图建立最大功率谱密度、峰值加速度与堆码层的变化规律模型,研究不同堆码层包装件在垂直和水平方向的振动强度,以期包装件防护优化设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

哈密瓜:西州蜜 17 号,选自同一批次,形状和大小均匀、成熟度相近、无损伤以及无病虫害,单果质量为 2.5 ~ 3.5 kg 的哈密瓜^[18],市售;

瓦楞纸箱:选用 0201 型纸箱,瓦楞组合为 BE 楞,外形尺寸为 462 mm×376 mm×168 mm;

缓冲材料:尺寸为 320 mm×110 mm~370 mm×160 mm 的泡沫网套和缓冲 5 层瓦楞纸板,根据长途运输装载的实际包装要求,将哈密瓜套上泡沫网套,每箱装 4 个,并用 4 块缓冲瓦楞纸板隔开(图 1),按照试验标准,共选用 15 箱进行试验。

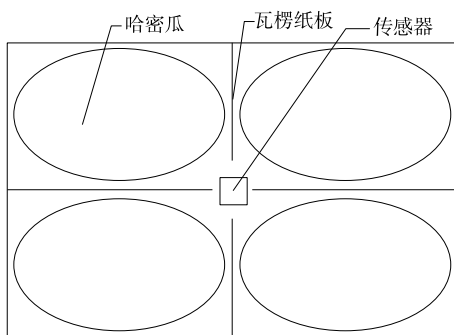


图 1 哈密瓜的装箱示意图

Figure 1 Schematic diagram of packing Hami melon

1.2 试验设备

低频振动台:DC-1000-15 型,配有 RC-3000-4 振动台控制仪,HT-8045A 可编程恒温恒湿处理机和传感器等设备,苏州试验仪器总厂;

智能数据采集和信号分析系统 DASP-V11/INV3062T 软件;北京东方振动和噪声技术研究所。

1.3 试验方法

为确保试验结果的准确性,严格按照 GB/T 4857.10

正弦扫频振动试验,模拟物流运输车辆在高速公路行驶的实际运输振动,设置 3 组重复试验,每组挑选 5 箱哈密瓜以堆码的方式进行正弦扫频振动试验。根据 GB/T 4857.2,试验前,将 15 箱哈密瓜放置于 HT-8045A 可编程恒温恒湿处理机中进行温湿度预处理(温度 23 ℃、相对湿度 50%、预处理时间 8 h)。相同温湿度条件下,预处理时间为 8,24 h 的试验结果基本一致,因此,为提高试验效率,预处理时间选择 8 h^[19]。将试验场地的温湿度调节至与温湿度预处理条件一致。将传感器固定于各层包装件底部的中间位置。为便于识别振动控制仪通道以及连接数据线路,将测试第 1~5 层垂直方向振动信号数据线分别连接到振动台控制仪的第 2、6、7、9、10 通道,将测试 1、3、5 奇数层前后方向振动信号的数据线分别连接到第 3、8、11 通道,受振动台控制仪通道数量的限制以及考虑传感器在堆码层布置的合理性,仅测试 1、3、5 奇数层前后方向的振动信号,以表征水平方向的振动情况。包装件的中心与振动台台面几何中心重合,其宽度和长度方向分别对应振动台前后和左右方向,并以逐层堆码的形式正立置于振动台台面上,用尼龙绳捆扎固定,防止试验过程中产生剧烈的晃动(见图 2)。在 DASP V11 软件中设置振动台的采样频率为 1 024 Hz,扫描频率为 5~100 Hz,扫描速率为每分钟 1/2 倍频程,启动堆码正弦扫频振动试验,并对振动信号进行实时采样^[16]。

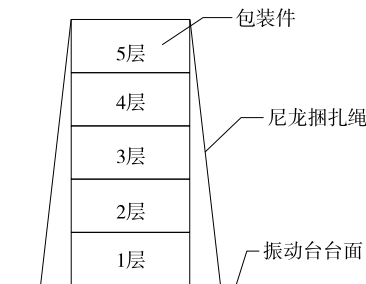


图 2 哈密瓜包装件 5 层堆码示意图

Figure 2 Schematic diagram of 5-layer stacking of Hami melon packaging

1.4 数据处理

采用 COINV DASP V11 软件对试验采集到的振动信号进行频域分析,获得固有频率和最大功率谱密度,并进行时域分析,获得峰值加速度。使用 Excel 2019 软件处理从 COINV DASP V11 导出的数据,使用回归建模分析对数据进行差异显著性分析,并使用 Origin 2019b 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 垂直和水平方向的固有频率

2.1.1 5 层包装件垂直方向的固有频率 采用 COINV DASP V11 软件对试验采集到的振动信号进行频域分析,

获得第1~5层包装件在垂直方向振动的功率谱密度,用Excel 2019软件分析各层功率谱密度,用Origin 2019b绘图,得到自功率谱图如图3所示,自功率谱反映的是各层功率随频率的变化关系。

当振动台给予的外激励振动频率等于包装件的固有频率时,包装件产生共振现象,自功率谱曲线的峰值所对应频率就是包装件在垂直方向振动的固有频率^[20]。由图3可知,第1~5层包装件在垂直方向的固有频率分别为9.86,54.75,9.75,9.92,10.31 Hz。

2.1.2 奇数层包装件水平方向的固有频率 由图4可知,第1、3、5层包装件水平方向的固有频率分别为10.12,10.44,11.13 Hz。

由图3和图4可知,功率谱密度值在频率为9~12 Hz时发生明显的跳跃,是由于扫频频率接近或等于固有频率时产生共振,振动能量大幅度增加,导致振动强度

显著增强,此时对应的频率(9~12 Hz)即为堆码包装件的共振频率。当扫频频率为9 Hz时,堆码包装件的振动强度明显增大,直至扫频频率为12 Hz时,该现象消失。因此,实际运输过程中应尽量避免产生9~12 Hz频段的路段,或者采用恰当的包装和运输方式,以有效避开共振频率,防止运输过程中产生共振而加速哈密瓜品质的劣变。

2.2 垂直和水平方向的峰值加速度

2.2.1 5层包装件在垂直方向的峰值加速度 由图5可知,5层包装件的第1~5层包装件垂直方向振动的峰值加速度分别为11.933 8,26.616 3,39.213 8,43.197 3,51.148 5 m/s^2 。

2.2.2 奇数层包装件在水平方向的峰值加速度 由图6可知,第1、3、5层包装件在水平方向振动的峰值加速度分别为5.047 2,6.786 9,9.645 4 m/s^2 。

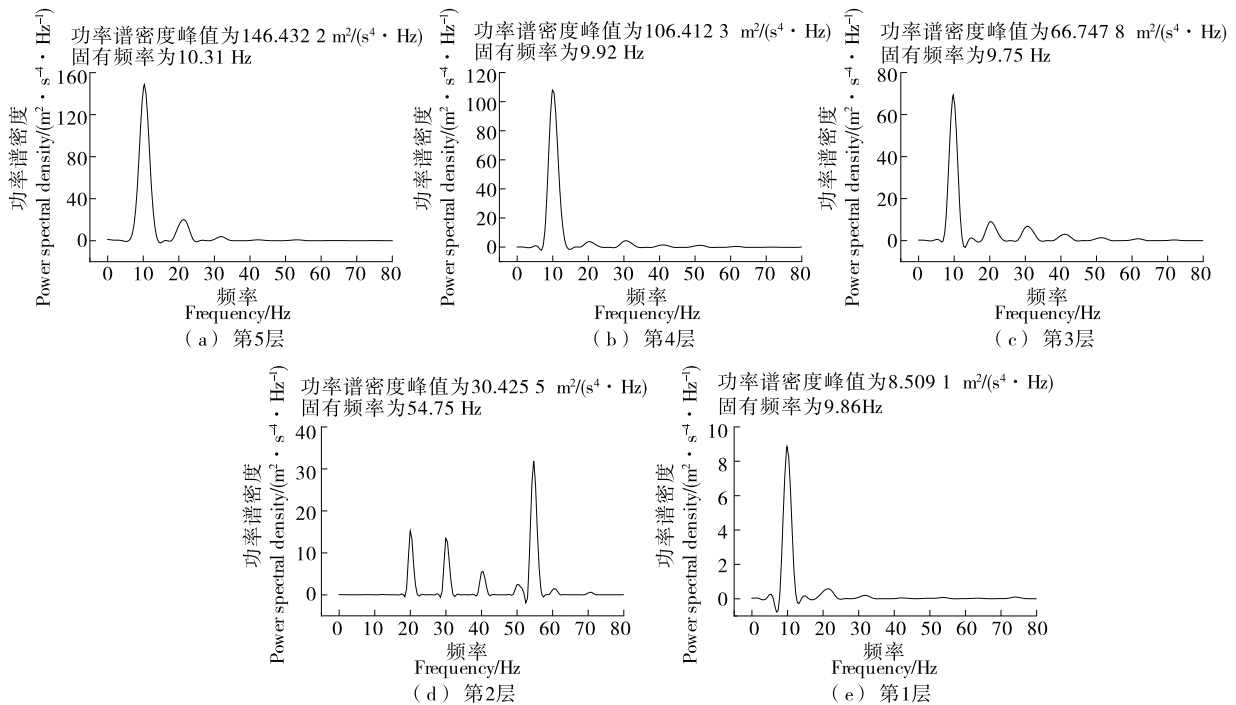


图3 堆码包装件在垂直方向的自功率谱

Figure 3 Self-power spectrum of stacked packaging pieces in the vertical direction

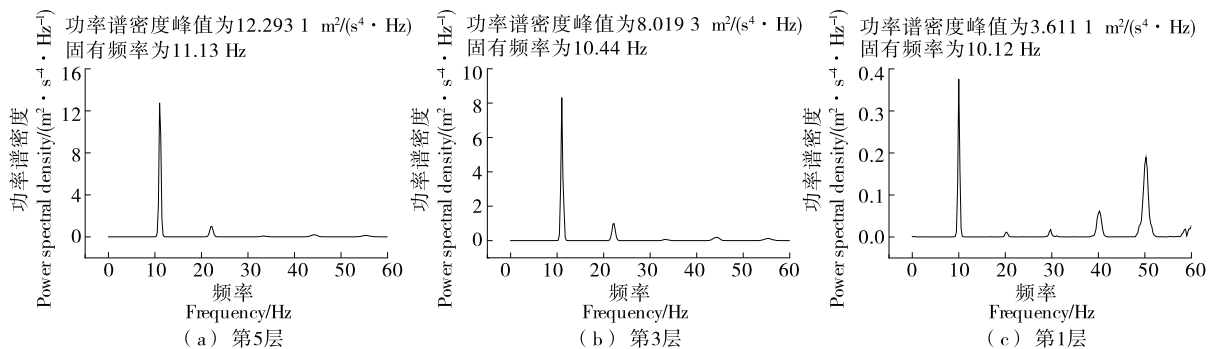


图4 奇数层包装件在水平方向的自功率谱

Figure 4 Self-power spectrum in the horizontal direction for odd-layered packaging parts

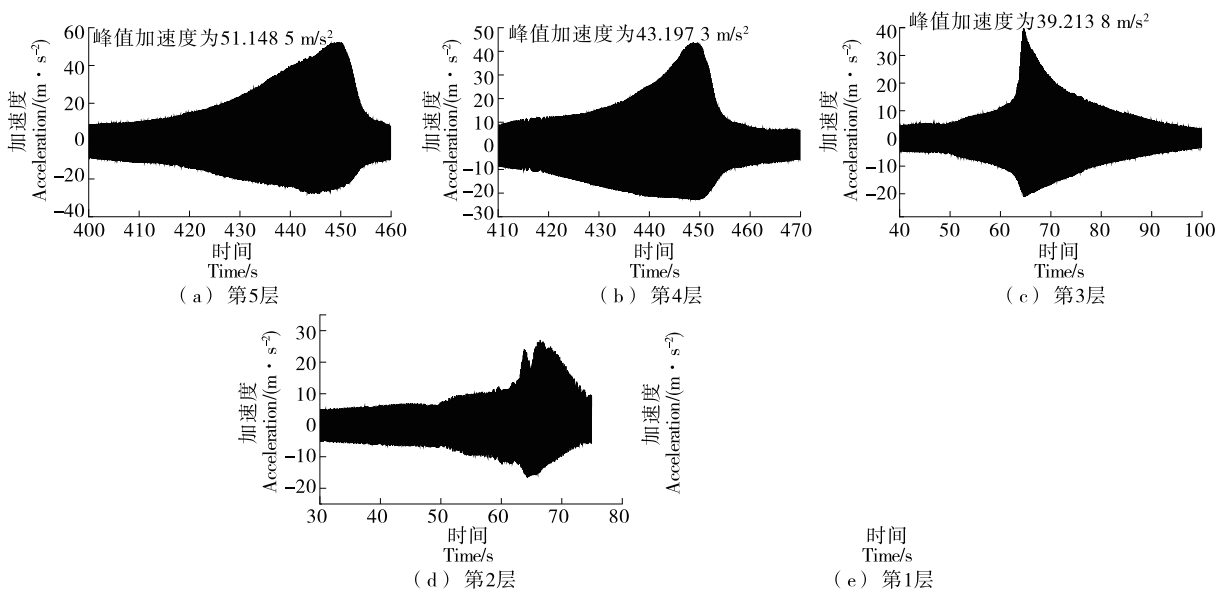


图 5 堆码包装件在垂直方向的时域响应图

Figure 5 Time domain response of stacked packaging parts in the vertical direction

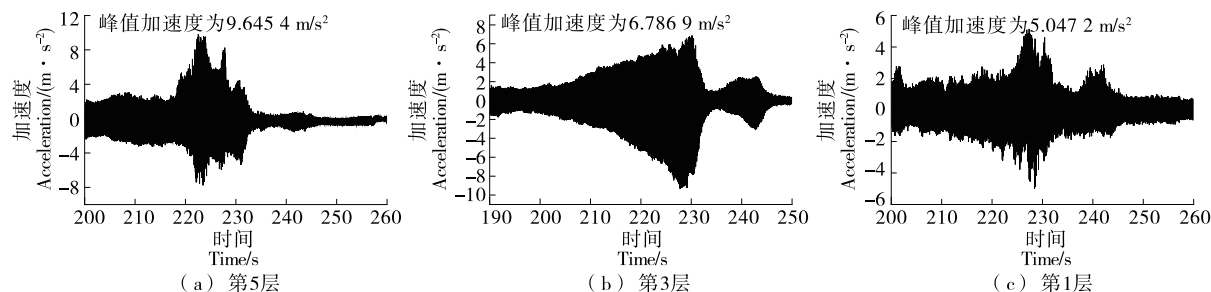


图 6 奇数层包装件在水平方向的时域响应图

Figure 6 Time domain response of an odd-layer package in the horizontal direction

结合图 5 和图 6 可知,垂直和水平方向振动的峰值加速度值均从底层到顶层呈递增趋势,与王璐璐等^[20]的研究规律相同。这是由于处于上层的包装所受的承载压力比下层的小,因此上层的约束程度小,导致上层的振动幅度比下层的大,从而使上层的冲击力和峰值加速度更大,对产品造成的损伤程度更大^[21-22]。因此,实际运输装载过程中对堆码包装件应进行合理的捆扎,以增加其约束程度,从而减小运载产品的振动幅度,达到减轻振动引起损伤的目的。

2.3 最大功率谱密度和峰值加速度与堆码层的关系

2.3.1 最大功率谱密度与堆码层的关系 自功率谱曲线反映的是振动过程中功率随频率的变化关系,功率谱密度越大表明振动产生的能量越大,即振动强度越强。表 1 为各层包装件垂直和水平方向的最大功率谱密度,根据其数据分别建立垂直和水平方向最大功率谱密度与堆码层关系的一元线性回归模型,并进行相关系数的显著性检验,选择显著水平为 $\alpha=0.05$ ^[23]。

垂直方向最大功率谱密度与堆码层关系的一元线性

表 1 垂直和水平方向的最大功率谱密度[†]

Table 1 Maximum power spectral density in the vertical and horizontal directions

功率谱密度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{Hz}^{-1}$)	堆码层				
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层
PSD1	8.509 1	30.425 5	66.747 8	106.412 3	146.432 2
PSD2	3.611 1	Null	8.019 3	Null	12.293 1

[†] PSD1、PSD2 分别表示垂直、水平方向的最大功率谱密度。

回归模型为:

$$y_1 = 35.189 1x_1 - 33.856 0, \quad (1)$$

式中:

x_1 ——堆码层,层;

y_1 ——功率谱密度, $\text{m}^2/(\text{s}^4 \cdot \text{Hz})$ 。

相关系数的显著性检验 ($\alpha=0.05$), 由于 $|r|=0.994 7 > r_{\alpha}(n-2)=r_{0.05}(3)=0.878$, 因此在显著水平为 0.05 条件下,垂直方向最大功率谱密度对堆码层的一元线性回归模型效果显著^[17], 因此该模型可以较准确地预

测垂直方向功率谱密度的变化规律(图 7)。

水平方向最大功率谱密度与堆码层关系的一元线性回归模型为:

$$y_2 = 2.172\ 9x_2 + 1.459\ 7, \quad (2)$$

式中:

x_2 ——堆码层,层;

y_2 ——功率谱密度, $\text{m}^2/(\text{s}^4 \cdot \text{Hz})$ 。

相关系数的显著性检验($\alpha = 0.05$), 由于 $|r| = 0.999\ 9 > r_{\alpha}(n-2) = r_{0.05}(1) = 0.997$, 因此在显著水平为 0.05 条件下, 水平方向最大功率谱密度对堆码层的一元线性回归模型效果显著, 因此该模型可以较准确地预测水平方向功率谱密度的变化规律(图 7)。

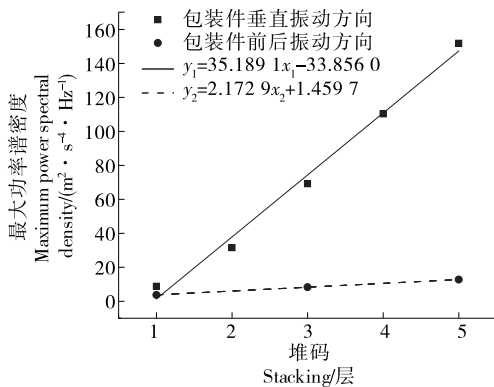


图 7 最大功率谱密度与堆码层的建模分析

Figure 7 Modeling analysis of maximum power spectral density with stacked layers

2.3.2 峰值加速度与堆码层的关系 表 2 为各层包装件垂直和水平方向的峰值加速度, 根据其数据分别建立垂直和水平方向峰值加速度与堆码层关系的一元线性回归模型, 进行相关系数的显著性检验, 选择显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。

表 2 垂直和水平方向的峰值加速度[†]

Table 2 Peak acceleration in vertical and horizontal directions

峰值加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	堆码层				
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层
a_1	11.933 8	26.616 3	39.213 8	43.197 3	51.148 5
a_2	5.047 2	Null	6.786 9	Null	9.645 4

[†] a_1 、 a_2 分别表示垂直方向、水平方向的峰值加速度。

垂直方向峰值加速度与堆码层关系的一元线性回归模型为:

$$y_3 = 9.568\ 3x_3 + 5.784\ 4, \quad (3)$$

式中:

x_3 ——堆码层,层;

y_3 ——功率谱密度, $\text{m}^2/(\text{s}^4 \cdot \text{Hz})$ 。

相关系数的显著性检验($\alpha = 0.05$), 由于 $|r| =$

$0.977\ 7 > r_{\alpha}(n-2) = r_{0.05}(3) = 0.878$, 因此在显著水平为 0.05 条件下, 认为包装件垂直方向的峰值加速度对堆码层的一元线性回归模型效果显著, 因此该模型可以较准确地预测垂直方向峰值加速度的变化规律(图 8)。

水平方向峰值加速度与堆码层关系的一元线性回归模型为:

$$y_4 = 1.149\ 5x_4 + 3.711\ 2, \quad (4)$$

式中:

x_4 ——堆码层,层;

y_4 ——功率谱密度, $\text{m}^2/(\text{s}^4 \cdot \text{Hz})$ 。

相关系数的显著性检验($\alpha = 0.05$), 由于 $|r| = 0.990\ 3 < r_{\alpha}(n-2) = r_{0.05}(1) = 0.997$, 在 5% 允许误差范围内, 因此在显著水平为 0.05 条件下, 认为包装件水平方向振动的峰值加速度对堆码层的一元线性回归模型效果显著, 因此该模型可以较准确地预测水平方向峰值加速度的变化规律(图 8)。

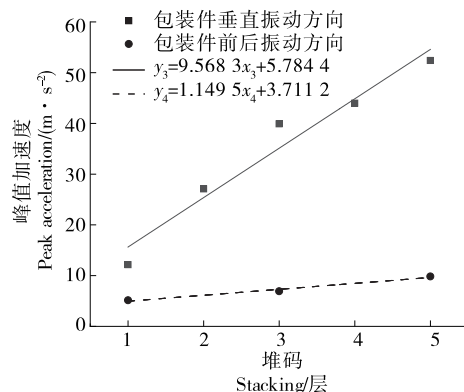


图 8 峰值加速度与堆码层的建模分析

Figure 8 Modeling analysis of peak acceleration with stacked layers

结合图 7 和图 8 可知, 垂直和水平方向最大功率谱密度值和峰值加速度从底层到顶层均呈递增趋势, 且垂直方向振动的递增速度更快; 同一堆码层垂直方向的功率谱密度和峰值加速度大于水平方向的; 垂直和水平方向的最大功率谱密度和峰值加速度与堆码层的关系均表现为极显著正相关, 因此所获得的模型可以较准确地预测各层包装件的最大功率谱密度和峰值加速度。由于不同堆码层的振动强度由底层到顶层逐渐增大, 因此上层的外部包装纸箱质量和内部缓冲材料性能要求更好; 由于同一堆码层的振动强度在垂直方向大于水平方向, 因此包装件在垂直方向的外部包装纸箱质量和内部缓冲材料性能要求更好。

3 结论

试验表明, ① 通过哈密瓜物流堆码模拟运输振动试验, 测定了堆码包装件的共振频率为 9~12 Hz; 用回归分析法获得最大功率谱密度和峰值加速度与堆码层关系的

振动模型,揭示出各层包装件的振动强度由底层到顶层呈递增趋势,同一堆码层在垂直方向的振动强度大于水平方向的。② 实际运输中应避免产生 9~12 Hz 频率的路径;缓冲包装优化设计时应依据包装件在不同堆码层和不同方向振动强度水平进行分等级防护优化设计,处于上层以及垂直方向的缓冲材料性能要求更好,即越往顶层以及垂直方向的防护等级要求更高。③ 要实现包装更全面的分等级防护优化设计,目前仅分析了不同堆码层垂直和水平方向的振动强度,信息还不够全面,如包装件在车厢板前部、中部和后部位置的振动强度信息以及寻求更优的集装堆码方式需进一步研究。

参考文献

- [1] 史勇,郭俊先,李雪莲,等.哈密瓜无损检测技术及分级装备的研究现状和发展趋势[J].包装与食品机械,2021,39(6): 75-82.
SHI Y, GUO J X, LI X L, et al. Research status and development trend of nondestructive testing technology and grading equipment for Hami melon[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 75-82.
- [2] 温馨,胡锐,赵金红,等.不同漂烫方式结合 CaCl₂ 预处理对哈密瓜品质的影响[J].农业机械学报,2014,45(10): 231-237.
WEN X, HU R, ZHAO J H, et al. Effect of different rinsing methods combined with CaCl₂ pretreatment on the quality of cantaloupe [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 231-237.
- [3] 周然,王锡昌,谢晶,等.热水结合果蜡处理抑制振动引起哈密瓜衰老的机理[J].农业工程学报,2014,30(24): 318-324.
ZHOU R, WANG X C, XIE J, et al. Mechanism of vibration-induced senescence in cantaloupe by hot water combined with fruit wax treatment [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 318-324.
- [4] 房世杰,徐斌,潘俨,等.振动对不同堆高哈密瓜果实现理化品质影响差异性研究[J].新疆农业科学,2018,55(9): 1 647-1 655.
FANG S J, XU B, PAN Y, et al. Differential effects of vibration on the physicochemical quality of cantaloupe fruits at different stack heights[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2018, 55(9): 1 647-1 655.
- [5] LIPINSKA M, TOMASZEWSKA M, KOOYN-KRAJEWSKA D. Identifying factors associated with food losses during transportation: Potentials for social purposes[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2 046.
- [6] 张哲,张治权,毛力,等.运输过程中机械振动对猕猴桃贮藏品质的影响[J].食品与机械,2017,33(1): 104-109.
ZHANG Z, ZHANG Z Q, MAO L, et al. Effect of mechanical vibration on storage quality of kiwifruit during transportation [J]. Food & Machinery, 2017, 33(1): 104-109.
- [7] WEI X, XIE D, MAO L, et al. Excess water loss induced by simulated transport vibration in postharvest kiwifruit [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 113-120.
- [8] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce: A review [J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 91: 9-24.
- [9] 夏铭,赵晓晓,徐昌杰,等.不同减振衬垫对模拟运输猕猴桃生理和品质影响[J].食品工业科技,2019,40(4): 276-279, 285.
XIA M, ZHAO X X, XU C J, et al. Effects of different vibration-damping liners on the physiology and quality of simulated transported kiwifruit [J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(4): 276-279, 285.
- [10] WANG L J, ZHANG Q, SONG H, et al. Mechanical damage of 'Huangguan' pear using different packaging under random vibration [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 187: 111847.
- [11] FADIJI T, COETZEE C, CHEN L, et al. Susceptibility of apples to bruising inside ventilated corrugated paperboard packages during simulated transport damage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2016, 118: 111-119.
- [12] 曾媛媛,王锡昌,周然,等.运输振动对哈密瓜贮藏品质的影响[J].食品与机械,2016,32(3): 141-144.
ZENG Y Y, WANG X C, ZHOU R, et al. Effect of transport vibration on storage quality of cantaloupe [J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 141-144.
- [13] ZHOU R, WANG X, HU Y, et al. Reduction in Hami melon (Cucumis melo var. saccharinus) softening caused by transport vibration by using hot water and shellac coating [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 110: 214-223.
- [14] 周然,曾媛媛.不同等级道路的运输振动对哈密瓜贮藏过程中抗氧化系统的影响[J].食品科学,2018,39(9): 176-181.
ZHOU R, ZENG Y Y. Effect of transport vibration on antioxidant systems of cantaloupe during storage on different levels of roads [J]. Food Science, 2018, 39(9): 176-181.
- [15] 刘建志,杨晓清,杜亚楠.振动频率对蜜瓜贮藏期间质构特性和细胞的影响[J].食品工业科技,2018,39(8): 240-244.
LIU J Z, YANG X Q, DU Y N. Effect of vibration frequency on textural properties and cells of honeydew melon during storage [J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(8): 240-244.
- [16] 张连文,杨传民,王勇,等.樱桃番茄运输包装件振动冲击性能试验[J].农业机械学报,2011,42(3): 125-130.
ZHANG L W, YANG C M, WANG Y, et al. Vibration and shock performance test of cherry tomato transport packaging [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 125-130.
- [17] 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.
CHENG X, YANG X Q, DONG T L G. Determination of transport resonance frequency of honeydew melon and its effect on storage quality [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 294-299.
- [18] 徐斌,阿塔吾拉·铁木尔,张婷,等.不同贮藏温度对西州密 25 号哈密瓜果实软化的影响[J].新疆农业科学,2022,59(5): 1 135-1 143.
XU B, Attahullah Timur, ZHANG T, et al. Effect of different storage temperatures on fruit softening of cantaloupes of Xizhou Mi 25 [J]. Xinjiang Agricultural Science, 2022, 59(5): 1 135-1 143.

(下转第 172 页)

- [22] STINTZING F C, HERBACH K M, MOSSHAMMER M R, et al. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 53(2): 442-451.
- [23] ALVAREZ-PZRRILLA E, DE LA ROSA L A, AMAROWICZ R, et al. Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeno and Serrano peppers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(1): 163-173.
- [24] SOUZA V R D, PEREIRA P A P, SILVA T L T D, et al. Determination of the bioactive compounds, antioxidant activity and chemical composition of Brazilian blackberry, red raspberry, strawberry, blueberry and sweet cherry fruits[J]. *Food Chemistry*, 2014, 156: 362-368.
- [25] 李锦锦, 莫然, 唐善虎, 等. 不同解冻方式对猪肝理化特性及氧化稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 302-309.
- LI J J, MO R, TANG S H, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and oxidation stability of porcine liver[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 302-309.
- [26] 冯钰敏, 梁诗惠, 邓华荣, 等. 不同解冻方式对鸭腿肉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 336-345.
- FENG Y M, LIANG S H, DENG H R, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of the duck leg meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 336-345.
- [27] 王晋, 高学慧, 陈云云, 等. 解冻方式对船载超低温鲑鱼肌肉保水性及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 159-164, 197.
- WANG J, GAO X H, CHEN Y Y, et al. Effect of thawing methods on water retention and quality of ship-borne ultra-low-temperature squid muscle[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 159-164, 197.
- [28] 靳青青, 马兆立, 李温静, 等. 解冻方法及解冻时间对冻结猪肉品质的影响[J]. *肉类工业*, 2013(11): 7-11.
- JIN Q Q, MA Z L, LI W J, et al. Effects of defrosting methods and time on quality of frozen pork[J]. *Meat Industry*, 2013(11): 7-11.
- [29] 张艳妮, 刘婷, 张雯雯, 等. 不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(22): 57-63.
- ZHANG Y N, LIU T, ZHANG W W, et al. Effects of different thawing methods on the physical quality of chicken breast[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(22): 57-63.
- [30] XIA X F, KONG B H, LIU J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 280-286.
- (上接第 130 页)
- [19] 张连文, 杨传民, 孟宪文. 水晶梨运输包装件振动冲击性能实验研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(11): 34-38, 45.
- ZHANG L W, YANG C M, MENG X W. Experimental study on the vibration and impact performance of crystal pear transport packaging parts [J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(11): 34-38, 45.
- [20] 王璐璐, 刘美华, 张连文, 等. 果品物流运输包装件堆码振动传递性能的试验研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(19): 5-10.
- WANG L L, LIU M H, ZHANG L W, et al. Experimental study on the vibration transmission performance of fruit logistics and transport packaging parts stacking [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(19): 5-10.
- [21] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 模拟 3 自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J]. *农业工程学报*, 2003(6): 219-222.
- KANG W M, XIAO N X, CAI J S, et al. Study on acceleration transfer rate and damage of fruit transport vibration under simulated 3-degree-of-freedom vibration conditions[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2003(6): 219-222.
- [22] 张连文, 杨传民, 孟宪文, 等. 圣女果运输包装件振动冲击性能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(1): 73-77.
- ZHANG L W, YANG C M, MENG X W, et al. Experimental study on the vibration and impact performance of the transport packaging of sainfoin[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(1): 73-77.
- [23] 朱元国, 范金华, 张军, 等. 高等工程数学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 288-296.
- ZHU Y G, FAN J H, ZHANG J, et al. Mathematics of higher engineering[M]. Beijing: Science Press, 2019: 288-296.
- (上接第 165 页)
- [21] LUCIELEN O D S, TATIANE A G, BEATRIZ T, et al. Glutathione production using magnetic fields generated by magnets [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2012, 55(6): 921-926.
- [22] LARAMEE C B, FRISCH P, MCLEOD K, et al. Elevation of heat shock gene expression from static magnetic field exposure in vitro [J]. *Bioelectromagnetics*, 2014, 35(6): 406-413.
- [23] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 交变磁场抑制葡萄冻害机理分析及试验研究[J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(2): 97-103.
- HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. Analysis and experimental study on the inhibition mechanism of grape freezing injury by alternating magnetic field [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(2): 97-103.
- [24] WELLER A, NOLTING F, STAERK H. A quantitative interpretation of the magnetic field effect on hyperfine-coupling-induced triplet formation from radical ion pairs [J]. *Chemical Physics Letters*, 1983, 96(1): 24-27.