

托盘堆码包装单元随机振动响应的实验研究

王志伟^{1,2,3}, 曹 燕^{1,2,3}

(1. 暨南大学包装工程研究所, 广东 珠海 519070; 2. 暨南大学产品包装与物流广东普通高校重点实验室, 广东 珠海 519070; 3. 暨南大学珠海市产品包装与物流重点实验室, 广东 珠海 519070)

摘要: 散装货物的托盘堆码单元是常见的运输包装形式。实验研究散装货物托盘堆码单元在随机振动激励下的产品加速度响应规律, 分析产品响应的机制, 讨论激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置的影响。结果表明: 托盘堆码系统各层产品加速度响应主要由一阶频率控制, 底层产品还受到高阶频率的影响。激励谱型尤其是第一共振点附近的功率谱值会对单元的产品响应产生重要影响; 当振动较大时, 底层产品与上层产品的加速度响应特征明显不同, 底层产品与支撑托盘或上层产品之间会出现分离, 产生较大的冲击信号, 导致底层产品加速度响应的超高斯分布; 捆扎带的拉压性能不对称(非线性)导致了上层产品加速度响应信号的不对称及其分布的左偏态超高斯特性; 拉伸膜缠绕裹包强化了捆扎带对单元的约束, 有效抑制了产品的响应。

关键词: 包装工程; 随机振动; 运输包装; 托盘堆码单元; 加速度响应

中图分类号: TB48; O324 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)06-1187-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.06.010

引 言

散装货物的托盘堆码单元是常见的运输包装形式, 它有利于保护产品、减少包装用量、提高物流效率和实现物流过程的标准化、机械化、自动化和智能化。托盘堆码单元在物流运输过程中常常受到运输工具的随机振动和冲击作用, 其抗振和抗冲击设计是托盘堆码单元设计的重要方面。但由于散装货物、堆码方式和捆扎方式的多样性, 托盘堆码单元的动力学特性分析和设计十分复杂。

货物运输包装动力学研究从单个包装件开始^[1-5], 随后扩展至堆码包装。在堆码包装系统的建模方面, URBANIK^[6]研究了多层堆码纸箱包装的传递率曲线; 王军等^[7-8]建立了多层堆码包装的动力学模型, 分析了脉冲幅值、材料阻尼及堆码层数对系统响应的影响。由于堆码包装的非线性特征, 其理论分析极为复杂, 实验研究和有限元技术提供了重要手段。THAKUR等^[9]考虑了堆码包装的非线性, 试验得到了上下两层产品位移的时域数据和加速度功率谱。URBANIK^[10], MARCONDES等^[11]通过测力板和压力传感器获得了堆码的动压力。Wang等和 Fang等^[12-14]、JAMIALAHMADI等^[15]获得了多层

堆码包装的加速度分布和功率谱、动压力分布和功率谱以及力水平穿越分布。Wang等和 Zhou等^[16-19]提出了基于元件加速度均方根-寿命曲线的堆码包装系统加速振动试验的理论与方法。物流中堆码包装的激励^[20-22]和响应^[23-28]信号的非高斯特征近年引起了研究者的注意, 响应信号的非高斯特征是由堆码包装的非线性引起, 如缓冲包装材料的非线性、产品的跳起等^[23-28]。

上述研究是针对瓦楞纸箱或塑料周转箱包装产品的简单叠层堆码, 堆码形式简单。实际物流过程中, 大量散装货物是通过托盘辅助捆扎和裹包形成整体的托盘堆码单元进行运输和仓储的。这一类托盘堆码单元的动力学特性和运输包装设计更为复杂, 至今几乎没有研究。本文选择蛋白粉罐作为试验产品, 采用具有代表性的分层堆码形式, 实验研究散装货物托盘集装单元在随机振动激励下的产品加速度响应规律, 分析产品响应的机制, 讨论激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置的影响, 为优化这一类运输单元的设计提供依据。

1 试验设计及仪器

试验选用的托盘堆码单元如图 1 所示。将某圆

柱形蛋白粉马口铁空罐分6层装载于木托盘,每层用2 mm厚的细瓦楞纸板衬垫隔开,顶部盖以木质盖板。木托盘尺寸1200 mm×1000 mm,蛋白粉罐内直径128 mm、高175 mm、厚0.2 mm。按层数从底层到顶层进行编号1-6,如图1(a)所示。蛋白粉罐每层70个交错排列,排列方式如图1(b)所示。

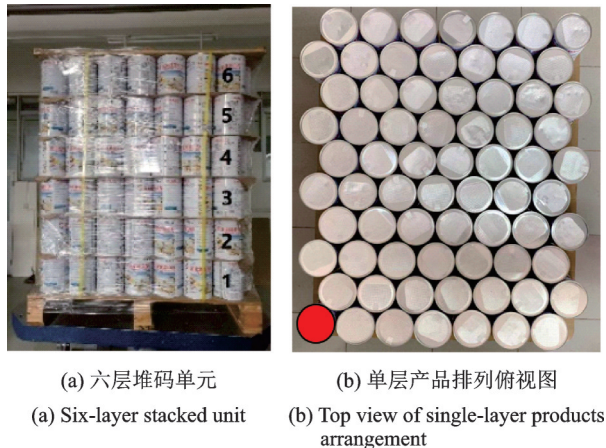


图1 托盘堆码单元

Fig. 1 Pallet stacked unit

为保持散装货物在托盘上的整体性,需要加以适当的约束形成一整体托盘堆码单元。最常见的约束方式有:使用打包带进行捆扎和使用拉伸缠绕膜进行裹包。为探究约束方式对托盘堆码单元中产品响应的影响,对托盘堆码单元施加不同的约束方式进行随机振动试验。选用1 mm厚的聚丙烯打包带和0.02 mm厚的聚乙烯拉伸缠绕膜施加约束。第一种方式是用四条打包带对托盘堆码单元进行井字形的两横两纵捆扎约束,第二种方式是打包带捆扎后再用两层拉伸缠绕膜对其进行缠绕裹包。两种约束方式俯视示意图如图2所示。

振动试验系统如图3所示。振动试验使用美国Lansmont公司型号为M7000-10的液压振动台,频率范围为3-300 Hz,最大承载重量为998 kg。采用美国National Instruction公司的数据采集仪进行加速度信号采集。由于同一层各蛋白粉罐响应统计差异不大,加速度传感器选择固定在图1(b)中红色标记的各层空罐的内底面上。

2 振动试验

2.1 扫频振动试验

为了了解托盘堆码单元的传递特性,对两种约束下的单元进行扫频振动试验,扫频范围为3-200 Hz,加速度幅值为0.2g,扫频速率为12 Hz/min。

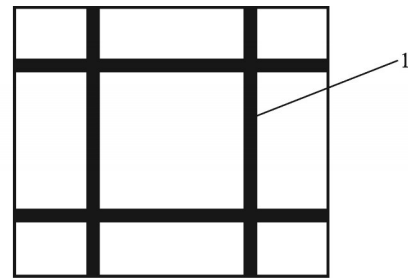
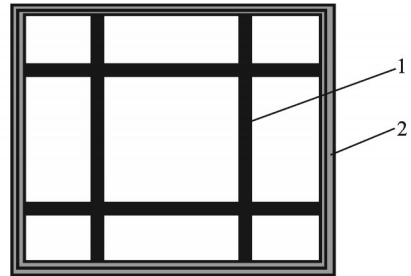
(a) 约束一:捆扎带
(a) Constraint 1: strapping(b) 约束二:捆扎带加拉伸膜缠绕裹包
(b) Constraint 2: strapping and stretched film wrapped

图2 两种约束方式(1-捆扎带;2-拉伸膜)

Fig. 2 Two kinds of constraints (1-strapping; 2-stretched film)

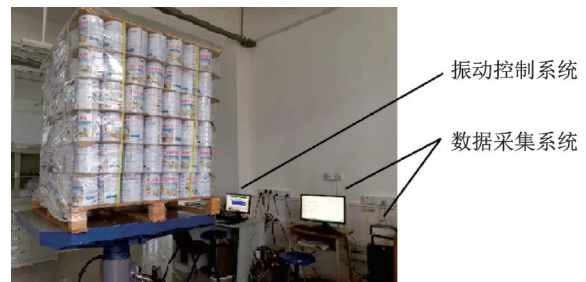


图3 振动试验系统

Fig. 3 Vibration test system

2.2 随机振动试验

根据扫频试验结果设置随机激励谱。在随机振动试验中输入两种激励谱:限带白噪声谱和修正的ASTM卡车运输振动功率谱(修正的ASTM谱指保持ASTM谱的谱型不变,仅降低强度等级)^[29],分别用于考察托盘堆码单元固有频率对产品响应的影响和模拟实际运输环境下的产品响应。为保证相同的总体振动强度,两种激励谱各振动等级的加速度均

方根值 G_{rms} 相等,相应的功率谱密度如表1和2所示。加速度响应的采样频率为1000 Hz,采样时间为2 min。

表1 限带白噪声功率谱(PSD)

Tab.1 Band-limited white noise power spectral density (PSD)

频率/Hz	功率谱密度(PSD)/ ($10^{-3}g^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)		
	等级一	等级二	等级三
1	0.6695	0.3344	0.1683
200	0.6695	0.3344	0.1683
加速度均方根 G_{rms}/g	0.365	0.258	0.183

表2 修正的ASTM功率谱(PSD)

Tab.2 Modified ASTM power spectral density (PSD)

频率/Hz	功率谱密度(PSD)/ ($10^{-3}g^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)		
	等级一	等级二	等级三
1	0.025	0.0125	0.0003
4	5	2.5	1.25
16	5	2.5	1.25
40	0.5	0.25	0.125
80	0.5	0.25	0.125
200	0.005	0.0025	0.0013
加速度均方根 G_{rms}/g	0.365	0.258	0.183

3 试验结果

3.1 扫频振动时产品加速度响应

通过正弦扫频试验得到托盘堆码产品响应的加速度-频率曲线。图4给出各层产品在第一种约束方式下扫频的加速度响应,图中编号1-6分别代表从底层到顶层的产品。

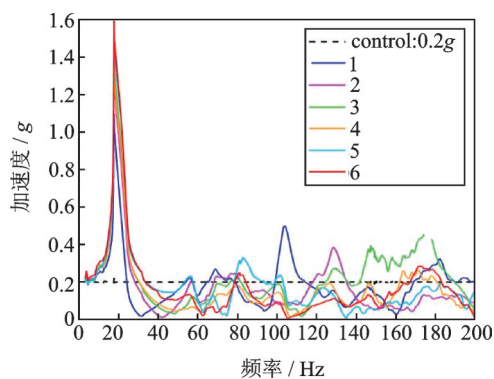


图4 扫频振动产品的加速度响应

Fig.4 Product acceleration response under sweeping-frequency vibration

从图4中可以看出,尽管该托盘堆码单元有多个共振点,但在第一共振点17.2 Hz处的响应十分显著,在其他共振点的响应不显著。多个共振点是由于各层较薄的细瓦楞纸板隔层衬垫引起的。产品在第一共振点的加速度响应由底层到顶层呈现递增趋势,底层和顶层产品的加速度响应分别为0.96g和1.58g。

第二种约束方式下的扫频结果与第一种约束下的结果趋势一致,只是第一共振点由17.2 Hz增大到18.4 Hz,这是因为在第二种约束方式下增加的拉伸膜缠绕裹包约束使托盘堆码单元的刚度略微增大。

3.2 随机振动时产品加速度响应功率谱

托盘堆码产品在随机振动下的加速度响应功率谱如图5和6所示。从图中可以看出,激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置对产品加速度响应功率谱(PSD)的峰值都有显著影响。

限带白噪声激励下,各层产品加速度响应功率谱均在第一共振点处出现很高峰值,并由底层到顶层递增,表明各层产品加速度响应主要由一阶频率控制。但底层产品在高阶共振点处还出现了峰,表明底层产品加速度响应还受到高阶频率的影响。第二种约束方式下的产品加速度响应功率谱明显低于第一种约束方式下的响应功率谱,表明拉伸膜缠绕裹包强化了对托盘堆码系统的约束,有效降低了产品的加速度响应。

在修正的ASTM谱激励下,各层产品加速度响应功率谱与限带白噪声激励下的响应功率谱特征类似,但产品加速度响应功率谱明显提高。如:在同振动等级一(control: 0.365g)和约束一情况下,限带白噪声下的顶层产品在第一共振点处加速度响应功率谱峰值为0.039 g^2/Hz ,而在修正的ASTM谱激励下响应值为0.094 g^2/Hz 。这是因为尽管两种谱总体激励强度相等,但在第一共振点附近修正的ASTM谱的激励能量远大于限带白噪声的激励能量(见表1和2)。表明激励谱型尤其是第一共振点附近的功率谱值会对该系统产品响应产生重要影响。由于实际运输过程中振动激励能量主要集中在低频段,所以该托盘堆码单元的产品会产生较大的加速度响应。

3.3 随机振动时产品加速度时域响应

由于第2至第6层加速度时域响应特征相近,两种约束下响应特征也比较相近,为节省篇幅,这里给出托盘堆码单元第1,3,6层产品在第二种约束下的加速度时域响应,如图7和8所示。第一种约束下的

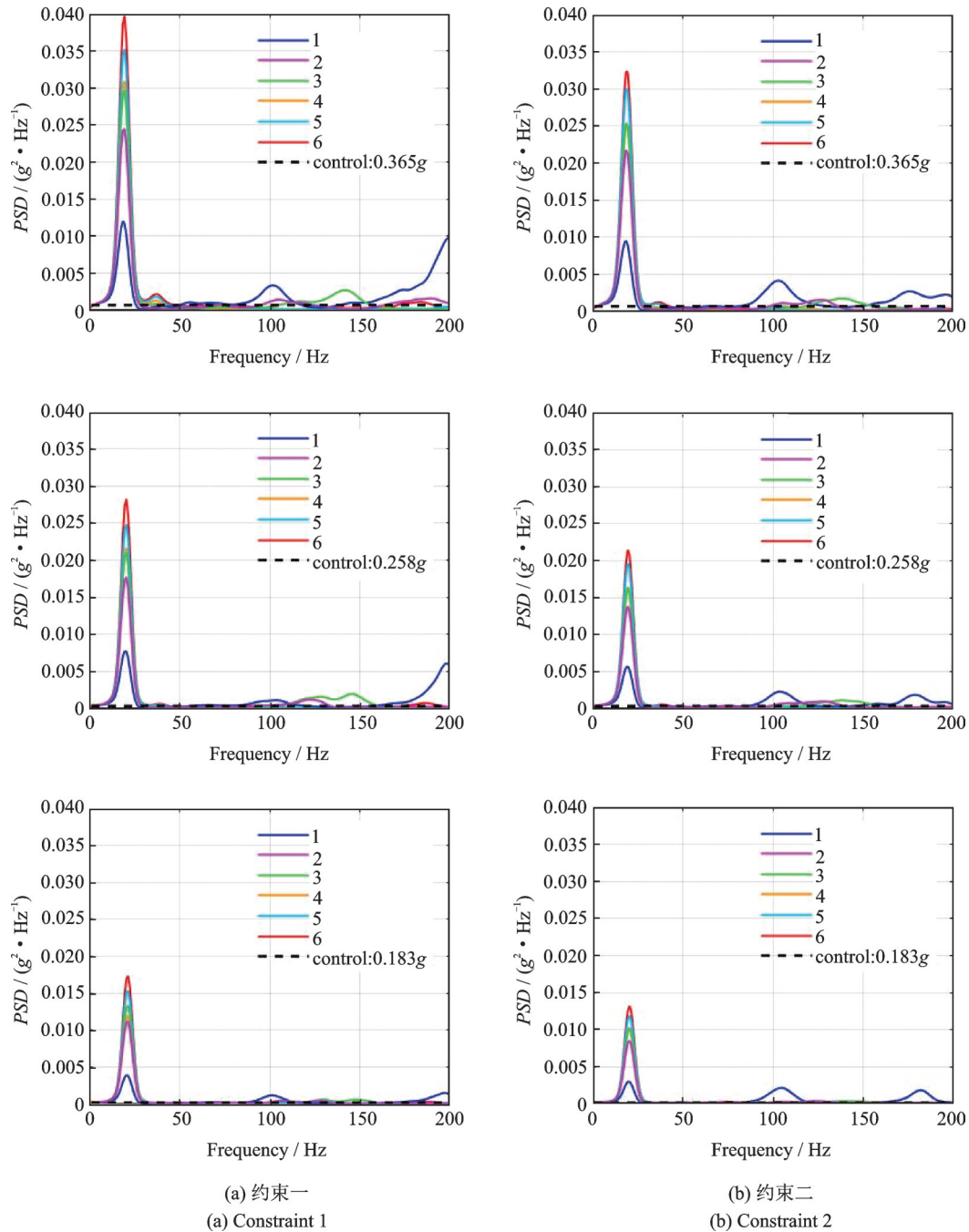


图5 限带白噪声激励下的加速度响应功率谱

Fig. 5 Power spectral density of acceleration response under band-limited white noise excitation

加速度时域响应列在附录1图A1中。从图中同样可以看出,激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置对产品加速度时域响应都有显著影响。

限带白噪声激励下,底层产品与第2至第6层产品的加速度时域响应特征明显不同,响应明显大,出现了较大的冲击信号。对比图7和附录1图A1也可看出,拉伸膜缠绕裹包有效抑制了底层产品的冲击信号。冲击信号的出现表明,在振动过程中底层产品与下面的支撑托盘或上层产品之间会出现分离状态。

由于在第一共振点附近修正的ASTM谱的激励

能量较大,各层产品的加速度时域响应与限带白噪声激励下的响应相比,响应值明显提高,底层产品也出现了较多、较大的冲击信号。响应特征也有较大不同,上层产品时域响应信号出现了不对称,尤其在较高振动强度和较弱约束下(见附录1图A1中修正的ASTM谱等级一和约束一情况)不对称性更为明显,负向加速度响应远大于正向加速度响应。这是因为振动剧烈时,托盘堆码单元竖向整体伸长与压缩明显,但捆扎带仅能单向拉伸、不能压缩,对产品只产生向下拉力作用。即捆扎带的拉压性能不对称(非线性)导致了加速度时域响应信号的不对称。

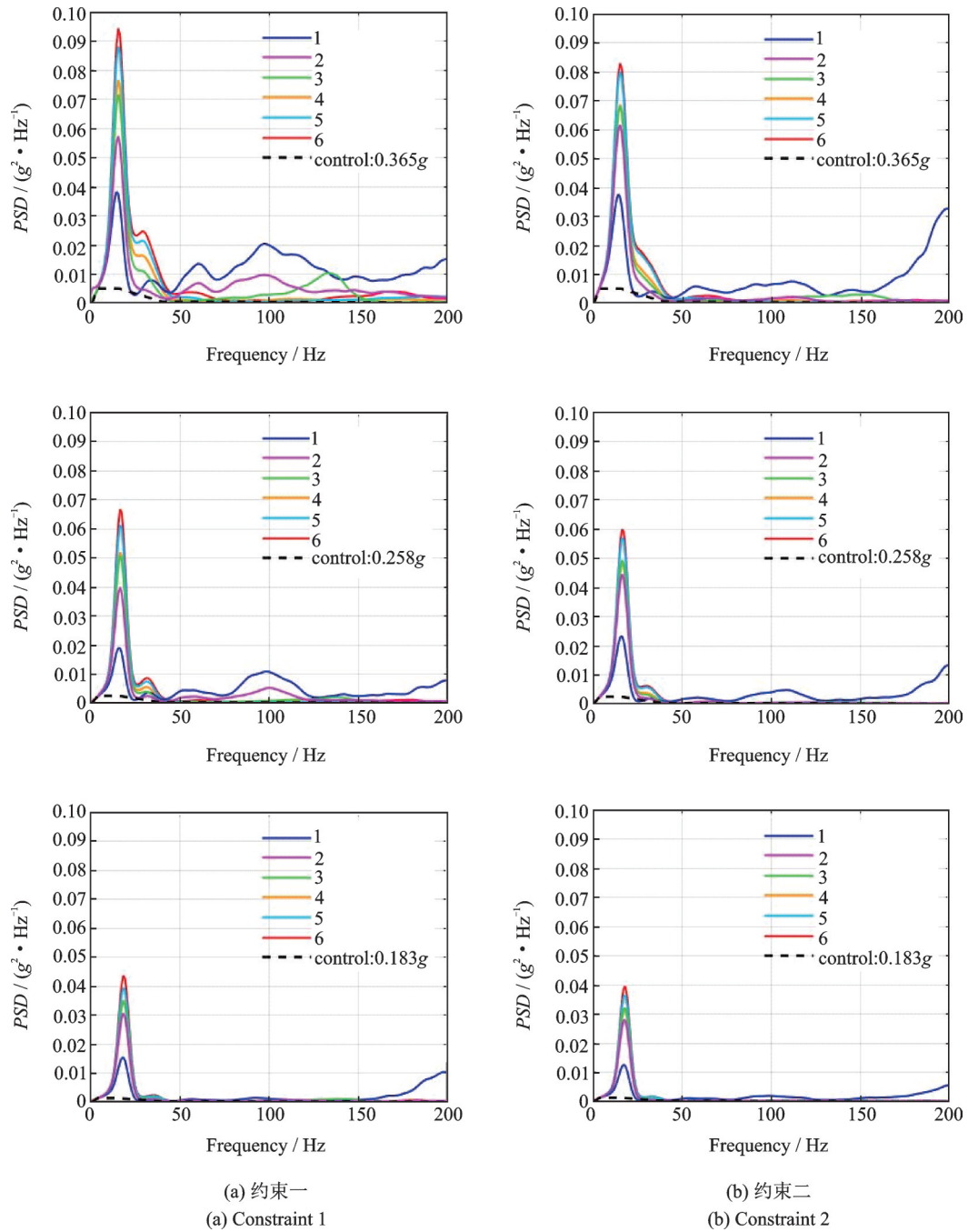
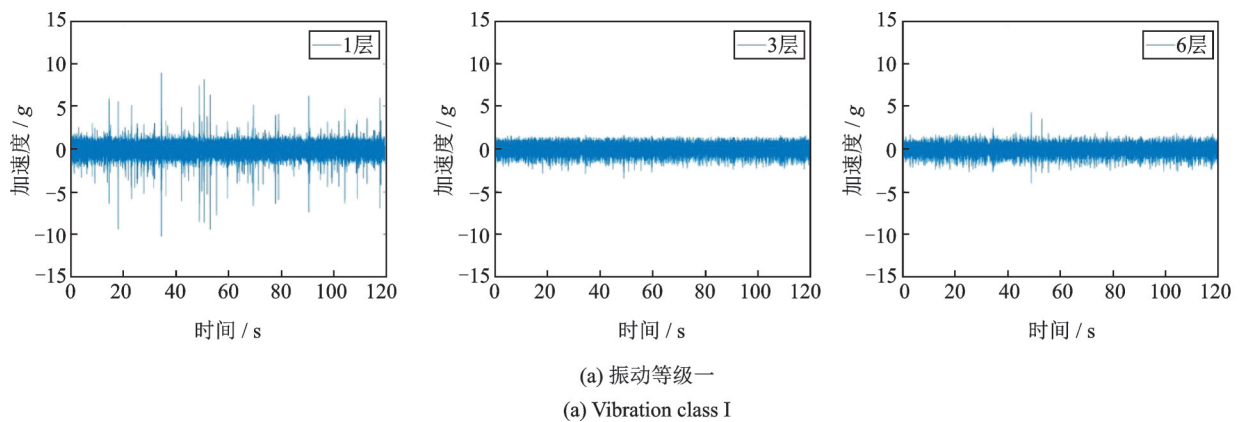


图 6 修正的 ASTM 谱激励下的加速度响应功率谱

Fig. 6 Power spectral density of acceleration response under modified ASTM spectrum excitation



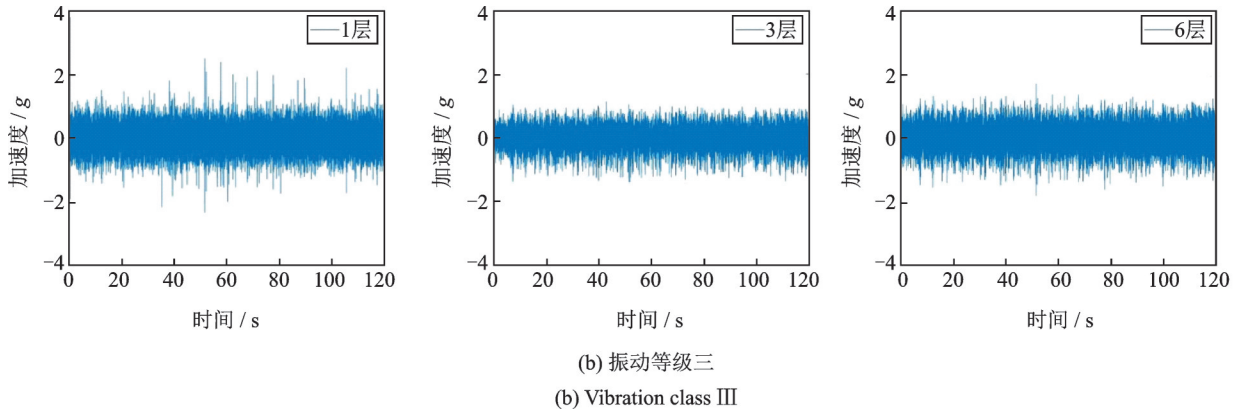


图7 限带白噪声激励下的加速度时域响应(约束二)

Fig. 7 Time-domain response of acceleration excited by band-limited white noise (constraint 2)

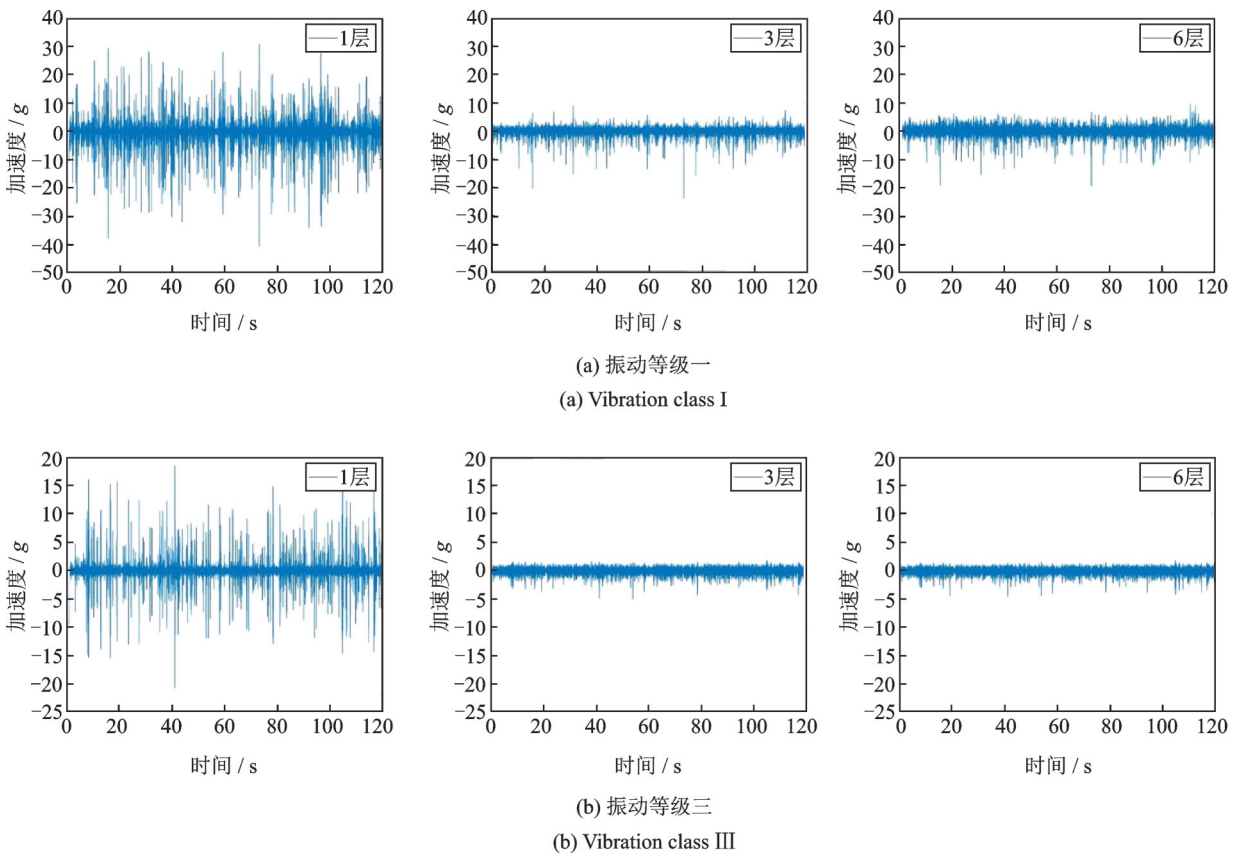


图8 修正的ASTM谱激励下的加速度时域响应(约束二)

Fig. 8 Time-domain response of acceleration excited by modified ASTM spectrum (constraint 2)

3.4 随机振动时产品加速度响应的概率密度分布

托盘堆码产品加速度响应的概率密度分布如图9和10所示。由于第2至第6层加速度概率密度分布特征相近,两种约束下也相近,为节省篇幅,这里给出托盘堆码单元第1,3,6层产品在第二种约束下的加速度概率密度分布,第一种约束下的加速度概率密度分布列在附录2图A2中。由于试验所用振动台输入信号为高斯信号,若托盘堆码系统表现为线性系统,则响应信号也应为高斯信号,因此,在图中同时给出了相应的高斯分布拟合曲线。

限带白噪声激励下,各层产品的加速度响应较

为接近高斯分布。但底层与顶层产品已出现非高斯分布现象,尤其在较弱的约束一情况下(见附录2图A2),底层产品响应已表现出明显的超高斯特征。

在修正的ASTM谱激励下,由于振动响应较为强烈,各层产品的加速度响应已是非高斯分布了。底层产品响应为超高斯分布,其他各层为左偏态超高斯分布。分布的左偏态与时域响应分析的结果一致,由捆扎带的拉压性能不对称引起。

同时,两种谱激励下,随着振动强度的提高,概率密度分布趋于平缓,表明有更宽范围的加速度响应分布,振动响应更为剧烈。

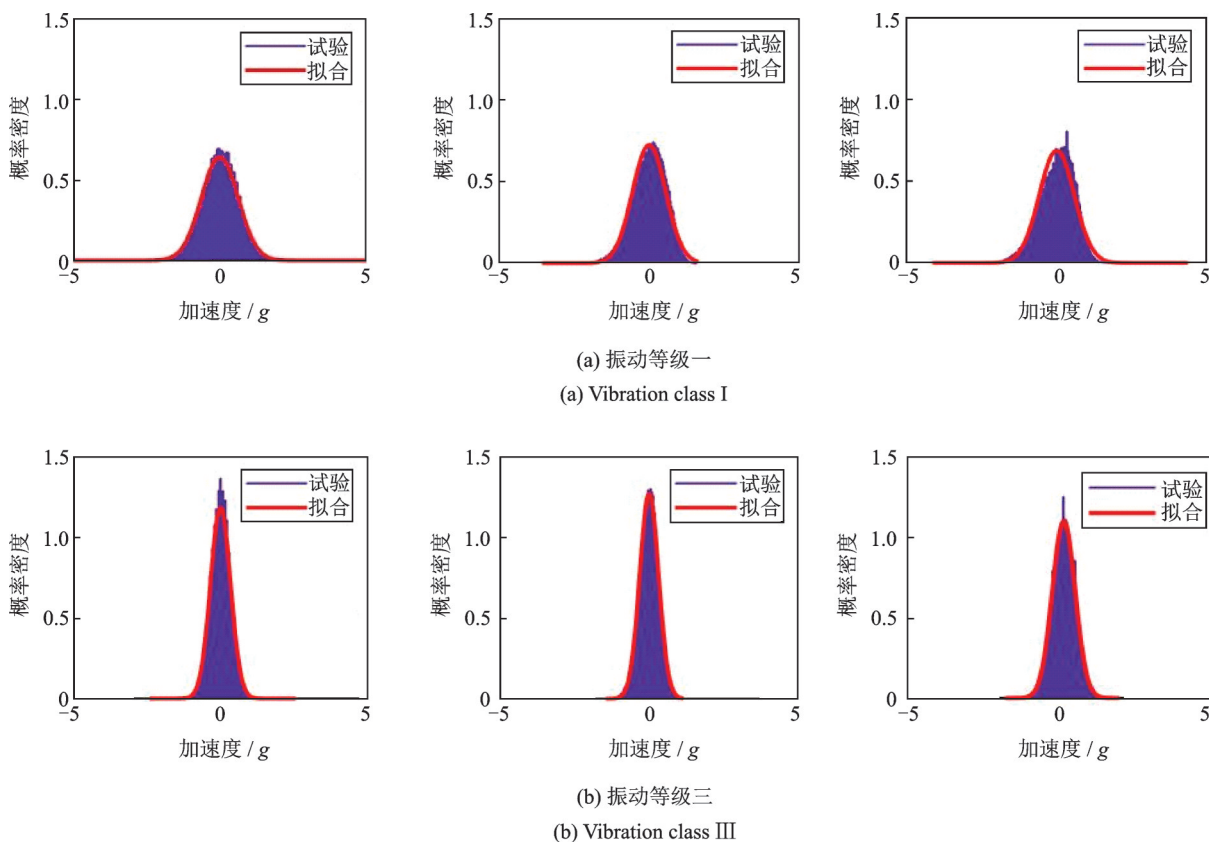


图 9 限带白噪声激励下加速度响应的概率密度分布(约束二,从左至右第 1,3,6 层)

Fig. 9 Probability density distribution of acceleration response excited by band-limited white noise (constraint 2, layer 1, 3 and 6 from left to right)

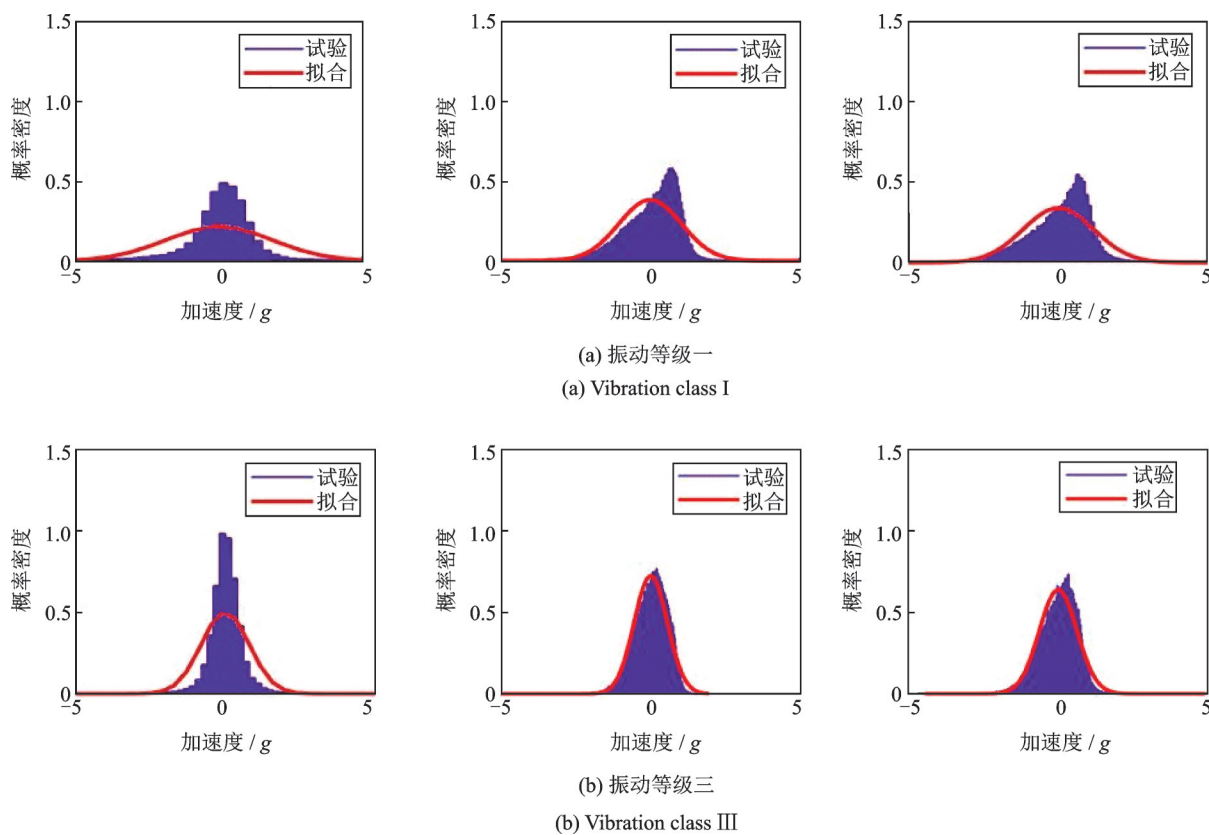


图 10 修正的 ASTM 谱激励下加速度响应的概率密度分布(约束二,从左至右第 1, 3, 6 层)

Fig. 10 Probability density distribution of acceleration response excited by modified ASTM spectrum (constraint 2, layer 1, 3 and 6 from left to right)

4 结 论

本文研究了托盘堆码单元在随机振动激励下的产品加速度响应,讨论了激励谱型、振动等级、约束方式和产品位置对其影响,分析了托盘堆码单元中产品响应的机制。综合分析后可得到以下主要结论:

(1) 尽管托盘堆码单元具有多个共振点,但各层产品加速度响应主要由一阶频率控制,底层产品还受到高阶频率的影响。激励谱型尤其是第一共振点附近的功率谱值会对系统的产品响应产生重要影响。随着振动强度的提高,产品加速度响应的概率密度分布趋于平缓,响应分布范围更宽。

(2) 当振动较大时,底层产品与下面的支撑托盘或上层产品之间会出现分离状态。底层产品与上层产品的加速度响应特征明显不同,出现了较大的冲击信号,导致底层产品加速度响应的超高斯分布。

(3) 捆扎带的拉压性能不对称(非线性)导致了上层产品加速度响应信号的不对称及其分布的左偏态超高斯特性。

(4) 拉伸膜缠绕裹包强化了捆扎带对托盘堆码系统的约束,有效抑制了产品的加速度响应。

上述结论对散装货物的托盘堆码单元运输包装设计具有现实的指导作用。

参考文献:

- [1] 王志伟. 现代包装力学[J]. 包装工程, 2002, 23(1): 1-5.
WANG Zhiwei. Modern packaging mechanics[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(1): 1-5.
- [2] WANG Z-W. On evaluation of product dropping damage[J]. Packaging Technology and Science, 2002, 15(3): 115-120.
- [3] Wang Z-W, Jiang J-H. Evaluation of product dropping damage based on key component[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23(4): 227-238.
- [4] Wang J, Wang Z-W, Lu L-X, et al. Three-dimensional shock spectrum of critical component for nonlinear packaging system[J]. Shock and Vibration, 2011, 18(3): 437-445.
- [5] Wang Z-W, Zhang Y-B. Dynamic characteristic analysis of refrigerator-truck transport system by using inverse substructure method[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27(11): 883-900.
- [6] URBANIK T J. Transportation vibration effects on unitized corrugated containers[R]. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL 322, 1978.
- [7] 王 军, 王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究(I): 冲击谱[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 106-107.
WANG Jnu, WANG Zhiwei. Combined shock spectrum of linear stacking packaging system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 106-107.
- [8] 王 军, 王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性研究(II): 破损边界[J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 108-109.
WANG Jun, WANG Zhiwei. Combined damage boundary curve of linear stacking packaging system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 108-109.
- [9] THAKUR K P, PANG D. Simulating complex loading patterns in the stack of packages[C]. Proceedings of the 10th IAPRI World Conference on Packaging, Melbourne, Australia, 1997.
- [10] URBANIK T J. Force plate for corrugated container vibration tests[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1990, 18(5): 359-362.
- [11] MARCONDES J A, SUCHUENEMAN H. Measurement and analysis of dynamic forces within a stack of packages[C]. Proceedings of the 20th IAPRI World Symposium on Packaging. San Jose: IAPRI, 2000.
- [12] Wang Z-W, Fang K. Dynamic performance of stacked packaging units[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(10): 491-511.
- [13] Fang K, Wang Z-W. The statistical characteristics of maxima of contact force in stacked packaging units under random vibration[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(5): 261-276.
- [14] Fang K, Wang Z-W. Influence of jumping phenomenon on response of package under random vibration[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(9): 585-599.
- [15] JAMIALAHMADI A, TROST T. A proposed tool to determine dynamic load distribution between corrugated boxes[J]. Packaging Technology and Science, 2011, 24(6): 317-329.
- [16] WANG Z-W, WANG L-J. Accelerated random vibration testing of transport packaging system based on acceleration PSD[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(10): 621-643.
- [17] WANG Z-W, WANG L-J. On accelerated random vibration testing of product based on component acceleration RMS-life curve[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(15): 3384-3399.
- [18] Zhou H, WANG Z-W. Comparison study on simulation effect of improved simulation methods for packaging random vibration test[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(3): 119-131.
- [19] WANG L-J, Lai Y-Z, WANG Z-W. Fatigue failure and G_{rms} - N curve of corrugated paperboard box[J]. Jour-

- nal of Vibration and Control, 2020, 26(11-12): 1028-1041
- [20] Zhou H, WANG Z-W. Measurement and analysis of vibration levels for express logistics transportation in South China [J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(10): 665-678.
- [21] Zhou H, WANG Z-W. A new approach for road-vehicle vibration simulation [J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(5): 246-260.
- [22] Borocz P. Vibration levels in vans as a function of payload and leaf spring sheet number [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(1): 236-243.
- [23] 刘远珍,王志伟.堆码包装产品响应的非高斯特征[J].包装学报, 2017, 9(4): 20-32.
LIU Yuanzhen, WANG Zhiwei. Non-Gaussian features of product response in stacked packaging unit [J]. Packaging Journal, 2017, 9(4): 20-32.
- [24] 房树盖,王志伟.不同加速度谱型激励下非线性堆码包装系统的动力学响应[J].应用力学学报, 2019, 36(6): 1286-1293.
Fang Shugai, Wang Zhiwei. Dynamic responses of nonlinear stacked packaging system under different spectral acceleration excitations [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(6): 1286-1293.
- [25] 林深伟,王志伟.两层堆码包装单元的随机振动响应[J].包装学报, 2017, 9(4): 10-19.
LIN Shenwei, WANG Zhiwei. Response of two layer stacked packaging unit in random vibration [J]. Packaging Journal, 2017, 9(4): 10-19.
- [26] 王志伟,戚德彬.两层计算机堆码包装动力学试验研究[J].机械工程学报, 2017, 53(3): 90-99.
WANG Zhiwei, QI Debin. Experimental study of dynamic response of two layers stacked packaging units of computers [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 90-99.
- [27] 王志伟,林深伟.随机振动下产品包装件动态响应的实验研究和有限元分析[J].振动与冲击, 2017, 36(13): 223-229.
WANG Zhiwei, LIN Shenwei. Tests and FE analysis for dynamic responses of packaged products under random vibration environment [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 223-229.
- [28] 孙君,王志伟.啤酒瓶周转箱随机振动响应的实验研究[J].振动工程学报, 2018, 31(5): 37-49.
SUN Jun, WANG Zhiwei. Experimental investigation of dynamic response of beer bottle-turnover boxes in random vibration [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(5): 37-49.
- [29] American Society for Testing and Materials. ASTM D4169-16 standard practice for performance testing of shipping containers and systems [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

Experimental investigation on response of random vibration for pallet stacked packaging unit

WANG Zhi-wei^{1,2,3}, CAO Yan^{1,2,3}

(1.Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 2.Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 3.Zhuhai Key Laboratory of Product Packaging and Logistics, Jinan University, Zhuhai 519070, China)

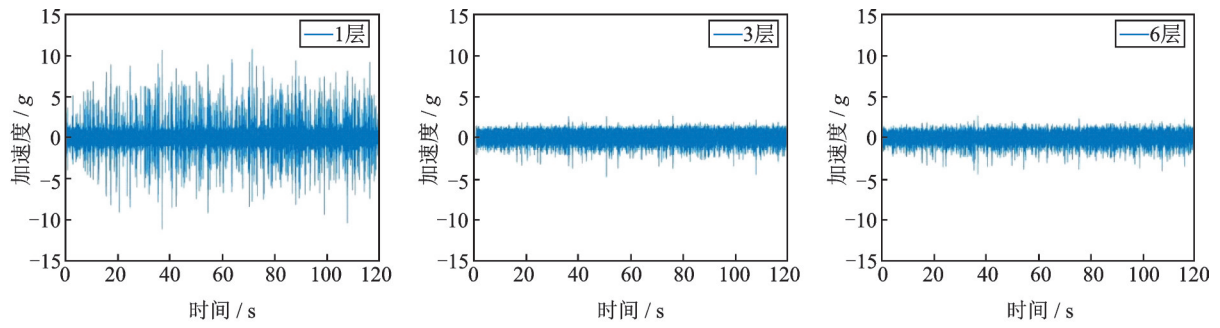
Abstract: Pallet stacked unit of bulk cargo is a common form of transportation packaging. This paper investigates experimentally the product acceleration response of pallet stacked unit of bulk cargo under random vibration excitation, and the mechanism of product response is analyzed. The influence of excitation spectrum, vibration level, constraint and product position is also discussed. The experiment results show that the product acceleration response at each layer is mainly controlled by the first resonance frequency, and that at the bottom is controlled together by higher order frequencies. The excitation spectrum type, especially the power spectral density in the first resonance region, has an important influence on the product response of the unit. When the vibration is large, the acceleration response of the bottom product is significantly different from that of the upper product, and a separation between the bottom products and supporting pallet or upper products occurs, which leads to a larger shock signal, resulting in the super Gaussian distribution of the acceleration response of the bottom product. The asymmetry (nonlinear) of tension and compression of the strapping leads to the asymmetry of the acceleration response signal and its left-skewness super Gaussian distribution. The stretched film wrapped strengthens the restraint of the strapping on the unit, and effectively inhibits the response of the product.

Key words: packaging engineering; random vibration; transport packaging; pallet stacked unit; acceleration response

作者简介: 王志伟(1963-),男,博士,教授,博士研究生导师。E-mail:wangzw@jnu.edu.cn

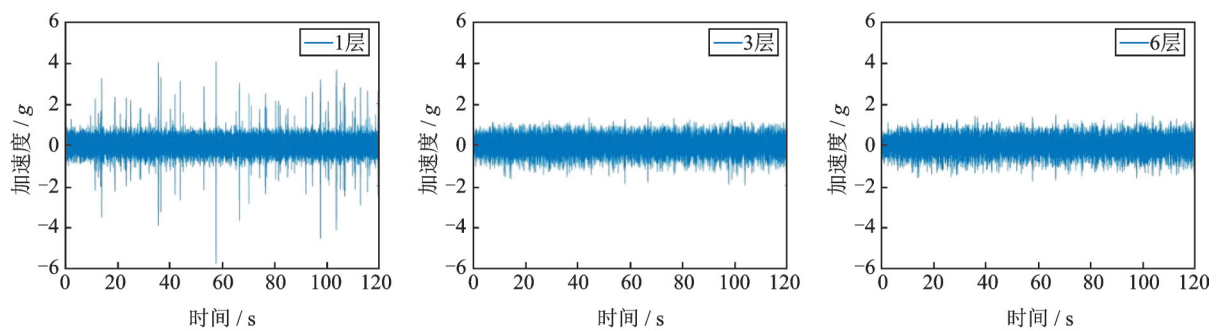
曹燕(1994-),女,硕士研究生。E-mail:cy1108cy@163.com

附录1



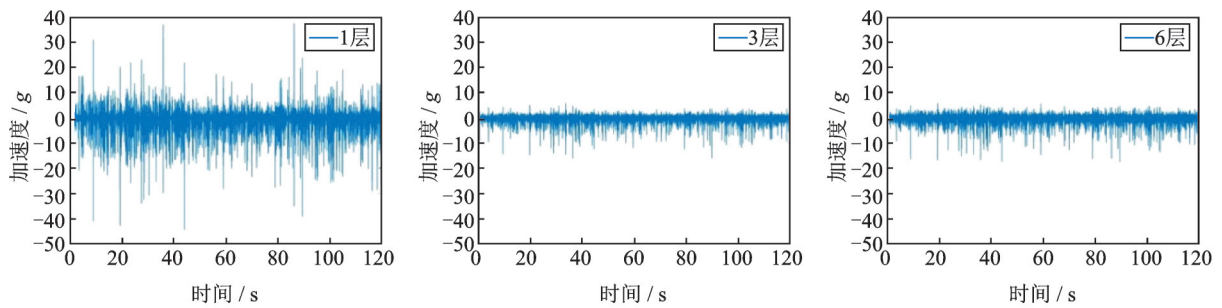
(a) 限带白噪声振动等级一

(a) Vibration class I of band-limited white noise



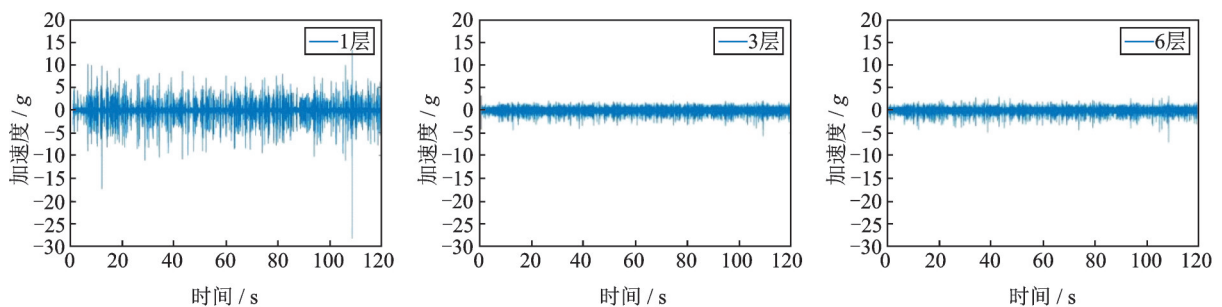
(b) 限带白噪声振动等级三

(b) Vibration class III of band-limited white noise



(c) 修正的ASTM谱振动等级一

(c) Vibration class I of modified ASTM spectrum



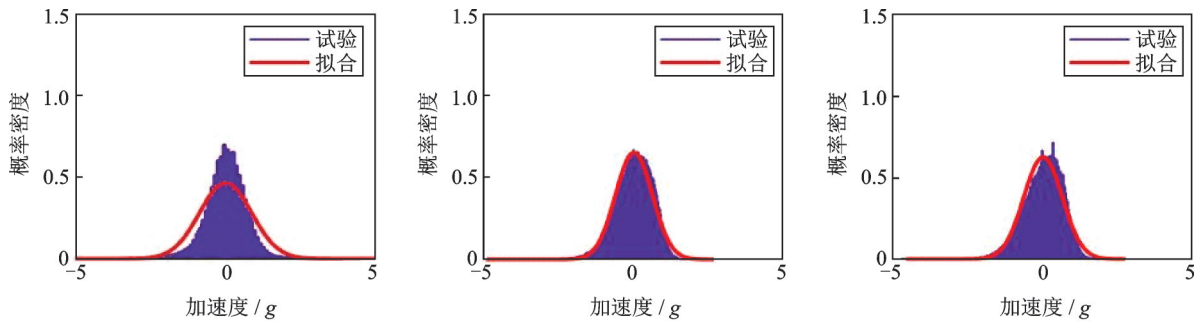
(d) 修正的ASTM谱振动等级三

(d) Vibration class III of modified ASTM spectrum

图A1 托盘堆码产品的加速度时域响应(约束一)

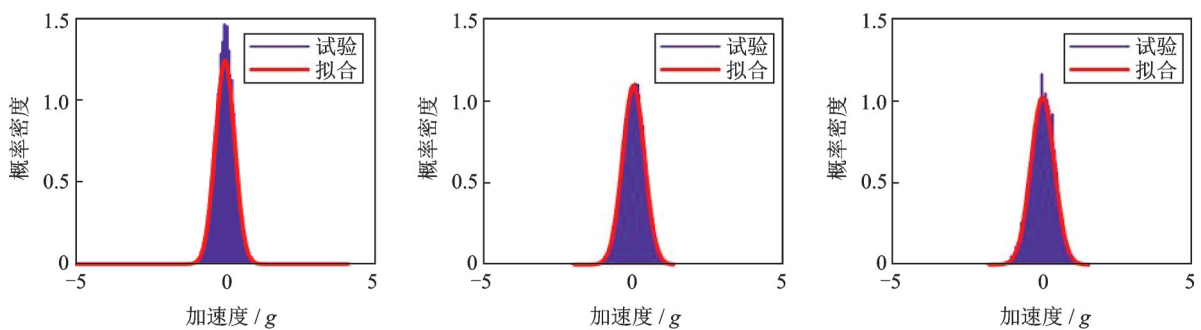
Fig. A1 Time-domain acceleration response of pallet stacked products (constraint 1)

附录 2



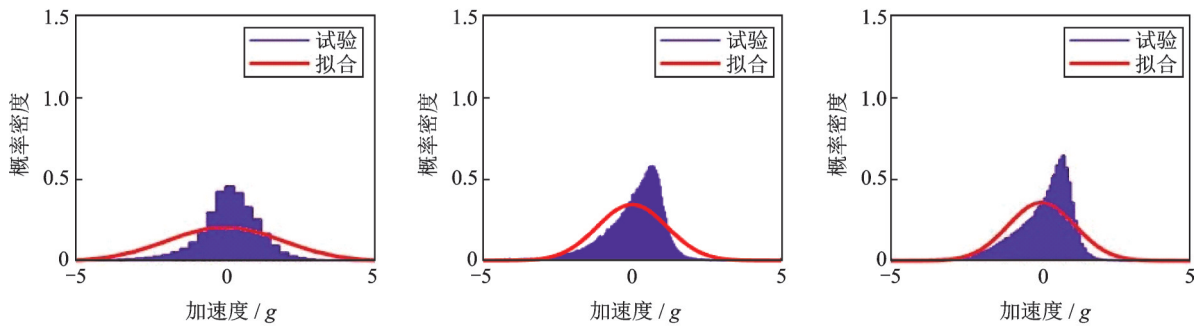
(a) 限带白噪声振动等级一

(a) Vibration class I of band-limited white noise



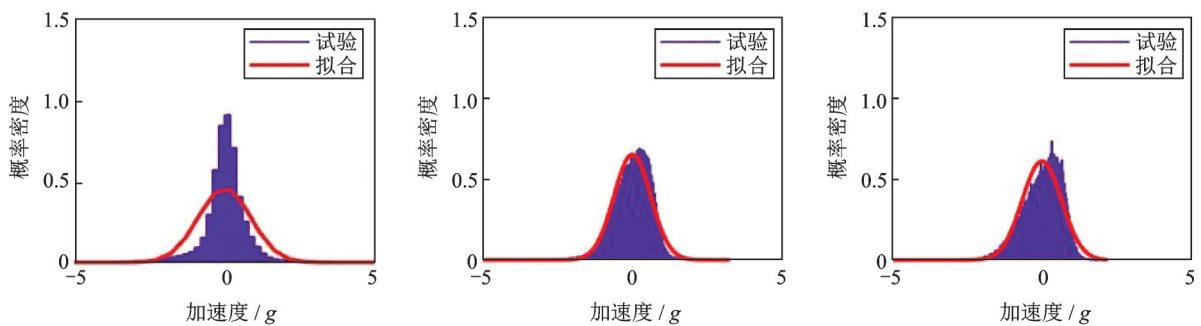
(b) 限带白噪声振动等级三

(b) Vibration class III of band-limited white noise



(c) 修正的ASTM谱振动等级一

(c) Vibration class I of modified ASTM spectrum



(d) 修正的ASTM谱振动等级三

(d) Vibration class III of modified ASTM spectrum

图 A2 托盘堆码产品加速度响应的概率密度分布(约束一,从左至右为第 1, 3, 6 层)

Fig. A2 Probability density distribution of acceleration response of pallet stacked products (constraint 1, layer 1, 3 and 6 from left to right)