

堆码包装产品响应的非高斯特征

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.04.003

刘远珍^{1,2,3} 王志伟^{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: 研究随机振动下三层堆码包装产品加速度响应的非高斯特征, 讨论引起非高斯响应的原因。试验结果表明: 无约束条件下, 上层包装件出现明显跳动, 产品加速度响应的概率密度分布呈现非高斯分布, 中层包装产品响应加速度的概率密度分布与高斯分布有一定程度的偏离, 下层包装产品响应加速度较为接近高斯分布; 弹性约束条件下, 当振动强度较大时, 上层包装产品响应加速度的概率密度分布与高斯分布偏离程度较大; 在固定约束时, 包装件跳动受到限制, 各层包装产品响应加速度基本符合高斯分布。

关键词: 堆码包装; 非高斯性; 随机振动; 偏度; 峭度

中图分类号: TB48; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2017)04-0020-13

0 引言

运输是包装件在流通过程中的必然环节。在运输过程中, 为提高车辆的装载率、节约运输成本, 包装产品大多以堆码形式摆放。因此随机振动激励下堆码包装产品加速度响应应成为包装动力学的研究重点^[1]。

在堆码包装系统动态响应的数学模型方面: K. P. Thakur 等人^[2]考虑堆码包装的非线性, 建立了多层堆码包装系统的理论模型, 并对两层堆码包装系统进行试验研究, 得到系统位移时域数据与加速度响应功率谱, 验证了理论模型的可靠性; 王军等人^[3-5]建立了多层堆码包装系统的动力学模型并求解, 研究半正弦脉冲激励下脉冲幅值、材料阻尼及堆码层数等因素对系统响应的影响; 杨晓谦^[6]考虑缓冲材料的单向有效性(只能被压缩, 不能被拉伸), 建立了两层堆码包装系统的动力学模型, 研究车辆经过减速带时, 缓冲材料刚度、车辆行驶速度、减速带高度等因素对包装件跳动与碰撞问题的影响。

在堆码包装系统动态响应的试验方面: C. Bernad

等人^[7]通过试验分析瓦楞纸箱堆码包装单元的振动特性, 研究包装堆码结构在模拟运输环境下的振动动力学特性; T. J. Urbanik^[8]通过扫频振动试验对多层堆码包装系统进行测试, 得到堆码产品的动态响应, 并通过加速度计和测力板测取堆码包装的动态响应以及堆码底部的动压力; W. D. Godshall^[9]试验研究了瓦楞纸箱顶部有、无负载时, 系统共振频率及振动传递率的变化规律; 陈倩等人^[10]研究强非线性包装振动系统在有界噪声激励下的响应信号随机平均, 并对系统稳态响应的联合概率密度分布进行模拟; 林深伟^[11]通过试验和有限元模拟研究了不同堆码层数、不同约束方式和不同振动等级下产品包装的加速度响应频域特性, 发现堆码包装单元的层数和约束方式对产品的响应具有重要影响; J. A. Marcondes 等人^[12]通过压力传感器得到随机振动下堆码包装的动压力, 发现动压力远超静压力, 且与振动频率有关; A. Jamialahmadi 等人^[13]采用 I-Scan 系统测量两层堆码纸箱水平和垂直方向上的动压力分布, 给出了其动压力的力水平穿越分布图; 王志伟等人试验研究了堆

收稿日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775100)

作者简介: 刘远珍(1991-), 女, 山东临沂人, 暨南大学硕士生, 主要研究方向为运输包装, E-mail: 13247343642@163.com

通信作者: 王志伟(1963-), 男, 江苏无锡人, 暨南大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事产品包装防护工程和食品包装安全技术方面的教学与研究, E-mail: wangzw@jnu.edu.cn

码产品模型和电脑机箱在不同预压和不同振动强度下的动态响应, 得到产品模型和电脑机箱的加速度响应功率谱密度、堆码纸箱层间动压力功率谱以及力穿越分布和最大动压力的分布^[14-17], 并于最近建立了基于元件加速度功率谱的包装产品加速振动试验的理论和方法^[18-19]。

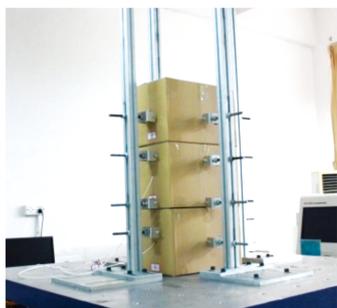
本文研究随机振动下三层堆码包装产品加速度响应的时域、频域和非高斯特征, 讨论缓冲垫、约束条件和振动强度对堆码包装产品加速度响应的影响。

1 研究方案

1.1 试验设计

为研究包装产品加速度响应的一般规律, 本文选用水泥块作为模拟产品, 水泥块尺寸为 300 mm × 140 mm × 180 mm, 水泥块质量为 17.5 kg。包装件是由水泥块、乙烯-醋酸乙稀共聚物 (ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA) 缓冲角垫和瓦楞纸箱组成。瓦楞纸箱外尺寸为 350 mm × 190 mm × 230 mm, EVA 缓冲角垫厚度为 20 mm。

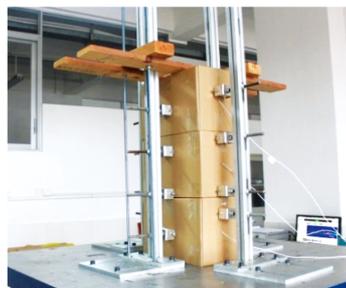
三层堆码包装在 3 种不同约束下的具体形式如图 1 所示。弹性约束时, 弹性绳对堆码包装的压力为 98 N。采用 2 种角垫缓冲产品响应, 2 种角垫有 3 种组合方式, 如图 2 所示。将缓冲面积为 3 600 mm² 的角垫记为 K, 缓冲面积为 7 200 mm² 的角垫记为 2K。



a) 无约束



b) 弹性约束



c) 固定约束

图 1 3 种约束方式下的三层堆码包装

Fig. 1 Three types of constraint to stacked packaging unit



a) K-K



b) K-2K



c) 2K-2K

图 2 3 种角垫组合形式

Fig. 2 Three combinations of cushion plates

1.2 试验仪器

试验所用液压振动台为美国 Lansmont 公司生产, 型号为 Model 7000, 频率范围为 1~300 Hz, 最大负载为 998 kg。振动台控制系统对随机振动的模拟是基于功率谱 (power spectral density, PSD) 曲线, 激励信号的概率密度分布符合高斯分布。

由于振动台配套软件 Touch Test Vibration 无法得到加速度响应时域历程, 因此试验中使用数据采集系统来采集产品加速度响应的实时数据。数据采集系统主要是由 ICP (inductive coupled plasma) 加速度传感器、信号适调仪、数据采集卡 (data acquisition,

DAQ) 及数据采集软件 NI Lab View Signal Express 组成。将加速度传感器按表 1 所示位置固定, 并连接至信号适配仪的 ICP 接口, 再将相应通道的 OUTPUT

端接入数据采集卡, 最后, 将 DAQ 的 USB 接口连入电脑, 使用 NI Lab View Signal Express 软件进行数据采集。

表 1 加速度传感器信息

Table 1 Parameters and position of the acceleration sensor

型号	灵敏度 / (mV·g ⁻¹)	量程 /g	位置	接口端
333B50-SN 56306	1 012.0	± 5	振动台	数据采集卡通道 1
333B40-SN 56814	510.0	± 10	底层水泥块	数据采集卡通道 2
333B40-SN 56815	498.0	± 10	底层水泥块	振动台通道 2
333B40-SN 53132	517.0	± 10	中层水泥块	数据采集卡通道 3
333B30-SN 56783	98.9	± 50	中层水泥块	振动台通道 3
333B30-SN 56035	1 025.0	± 50	上层水泥块	数据采集卡通道 4
333B30-SN 55306	101.1	± 50	上层水泥块	振动台通道 4

1.3 随机振动试验

选用限带白噪声谱作为随机振动激励谱, 振动分为 3 个等级, 相应的频率、功率谱密度和加速度均方根数据见表 2。每做完一次试验后更换缓冲角垫, 每次试验的振动时间为 6 min。水泥块加速度响应的 PSD 通过振动台控制系统的 Touch Test Vibration 软件直接得到, 实时加速度数据由数据采集软件 NI Lab View Signal Express 记录, 采样频率为 800 Hz, 采样时间为 5 min。试验数据用 Matlab 软件处理后进行分析。

表 2 限带白噪声激励 PSD 数据

Table 2 Band limited white noise PSDs

频率 /Hz	功率谱密度 / (g ² ·Hz ⁻¹)		
	level I	level II	level III
4	0.002 72	0.001 35	0.000 67
200	0.002 72	0.001 35	0.000 67
加速度均方根 G _{rms} /g	0.731	0.517	0.365

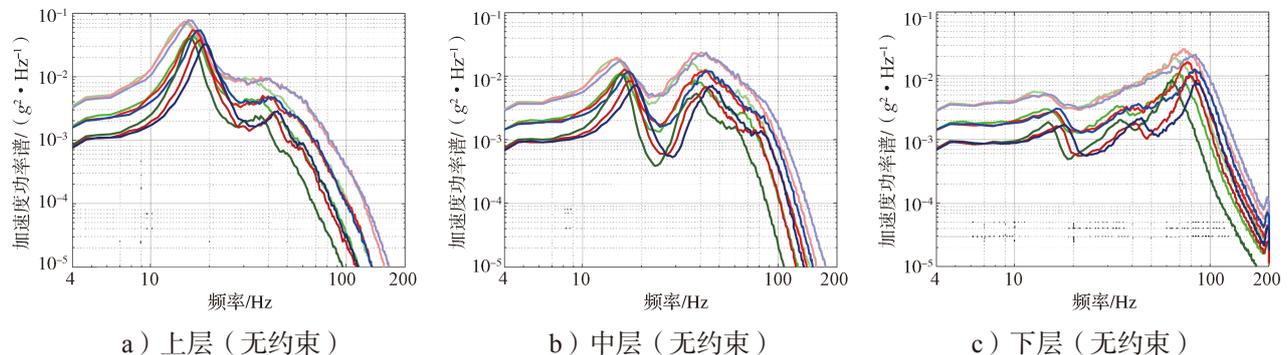
验条件下的堆码包装件均有 3 个共振频率; 上层水泥块的共振加速度 PSD 的最大值出现在第一阶共振频率处, 且大于此处中层和下层水泥块的共振加速度 PSD 值, 在第二、三阶共振频率处, 其共振加速度 PSD 值变化不明显; 中层水泥块的共振加速度 PSD 值在第一、二阶共振频率处明显增大, 且在第二阶共振频率处, 中层水泥块的共振加速度 PSD 值高于上层和下层水泥块的共振加速度 PSD 值; 下层水泥块的共振加速度 PSD 值在第一、二、三共振点处均有明显增加, 且在第三共振点处下层水泥块的共振加速度 PSD 值高于上层和中层水泥块的共振加速度 PSD 值。这说明三层堆码包装系统中, 上层包装件的加速度功率谱主要由第一阶共振频率控制, 中层包装件的加速度功率谱主要受第一和第二阶共振频率共同控制, 下层包装件的加速度功率谱主要由第三阶共振频率控制。

2 试验结果与分析

2.1 水泥块的加速度响应功率谱

三层堆码包装件中水泥块在限带白噪声激励谱下的加速度响应 PSD 见图 3。由图 3 可知: 不同试

验同一约束方式下, 随着振动强度的下降, 处于同一堆码层数的水泥块加速度响应 PSD 明显下降, 共振频率明显增大。这种共振频率的变化主要由 EVA 材料的非线性特征所引起。同一振动等级下, 约束后堆码包装系统的各阶共振频率较无约束时有所增大。



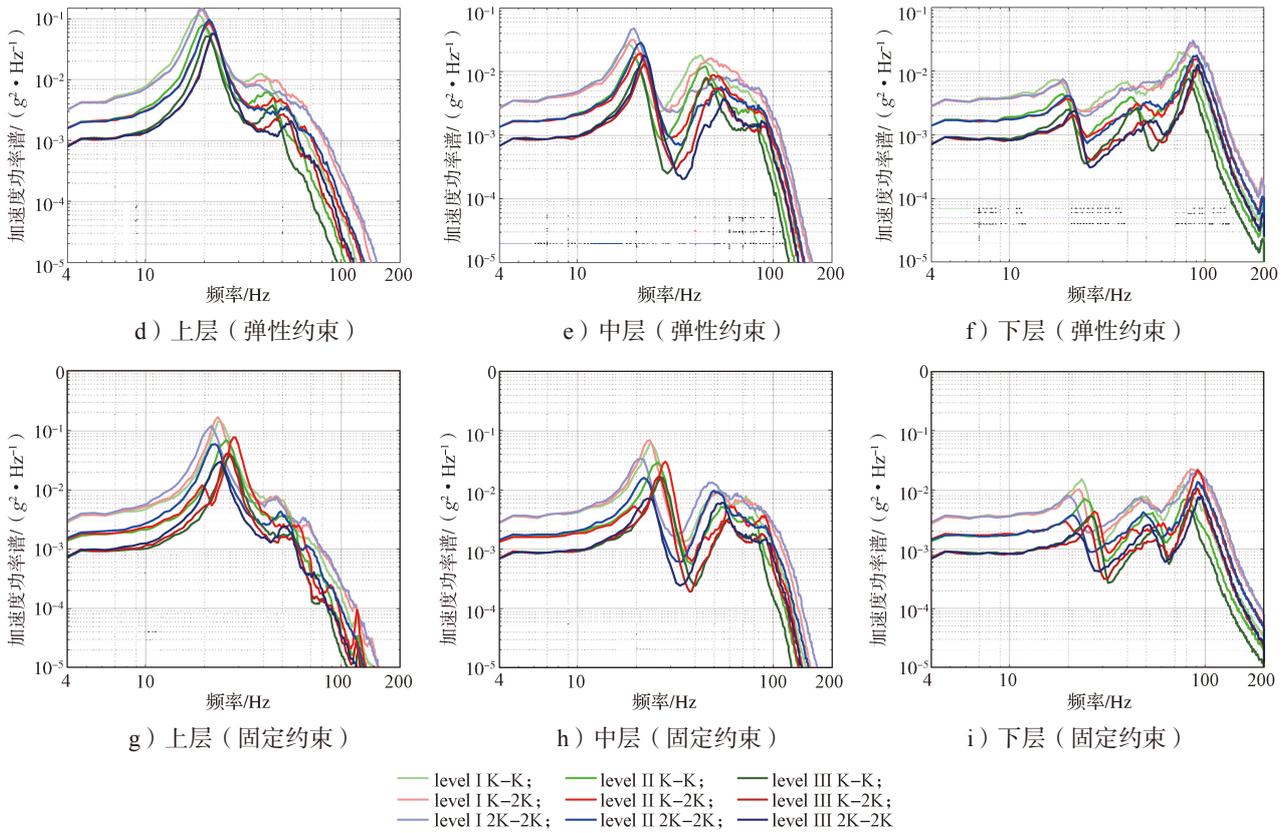


图3 水泥块的加速度响应功率谱

Fig. 3 Acceleration PSDs of concrete block

2.2 水泥块加速度响应的时间历程

图4为限带白噪声激励下振动台加速度在100 s和5 s内的时间历程。由图4可以看出,不同振动强

度(由 level I 到 level III)下振动台的正反向加速度基本对称。

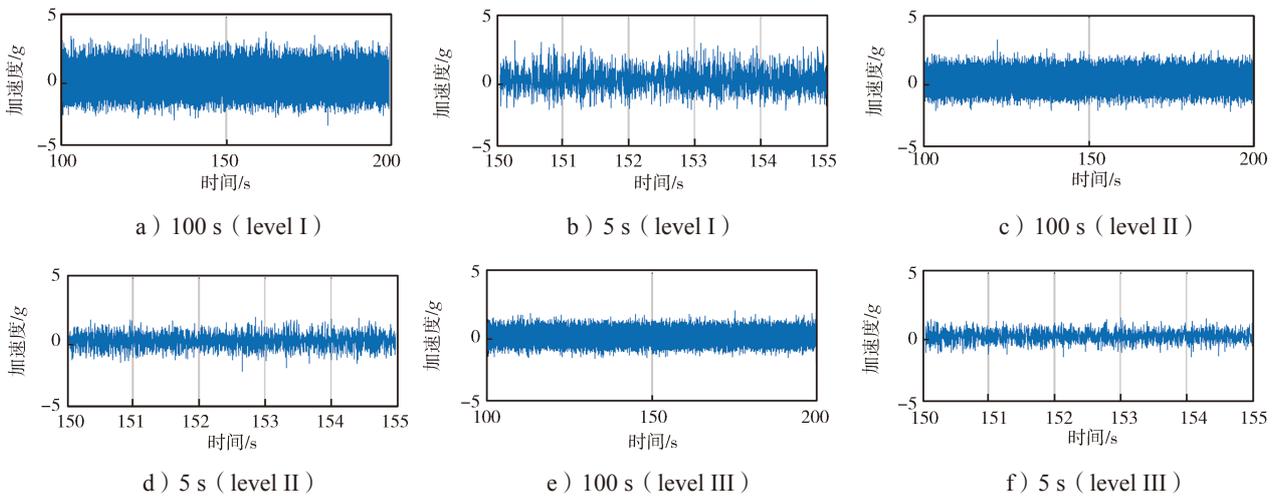


图4 限带白噪声激励时振动台加速度信号的时间历程

Fig. 4 Acceleration of vibration table under band limited white noise PSDs

图5~7为不同试验条件下水泥块加速度响应在100 s和5 s内的时间历程(为节省篇幅这里仅给出

角垫组合为 K-K 时水泥块加速度响应时间历程)。由图5~7可知:

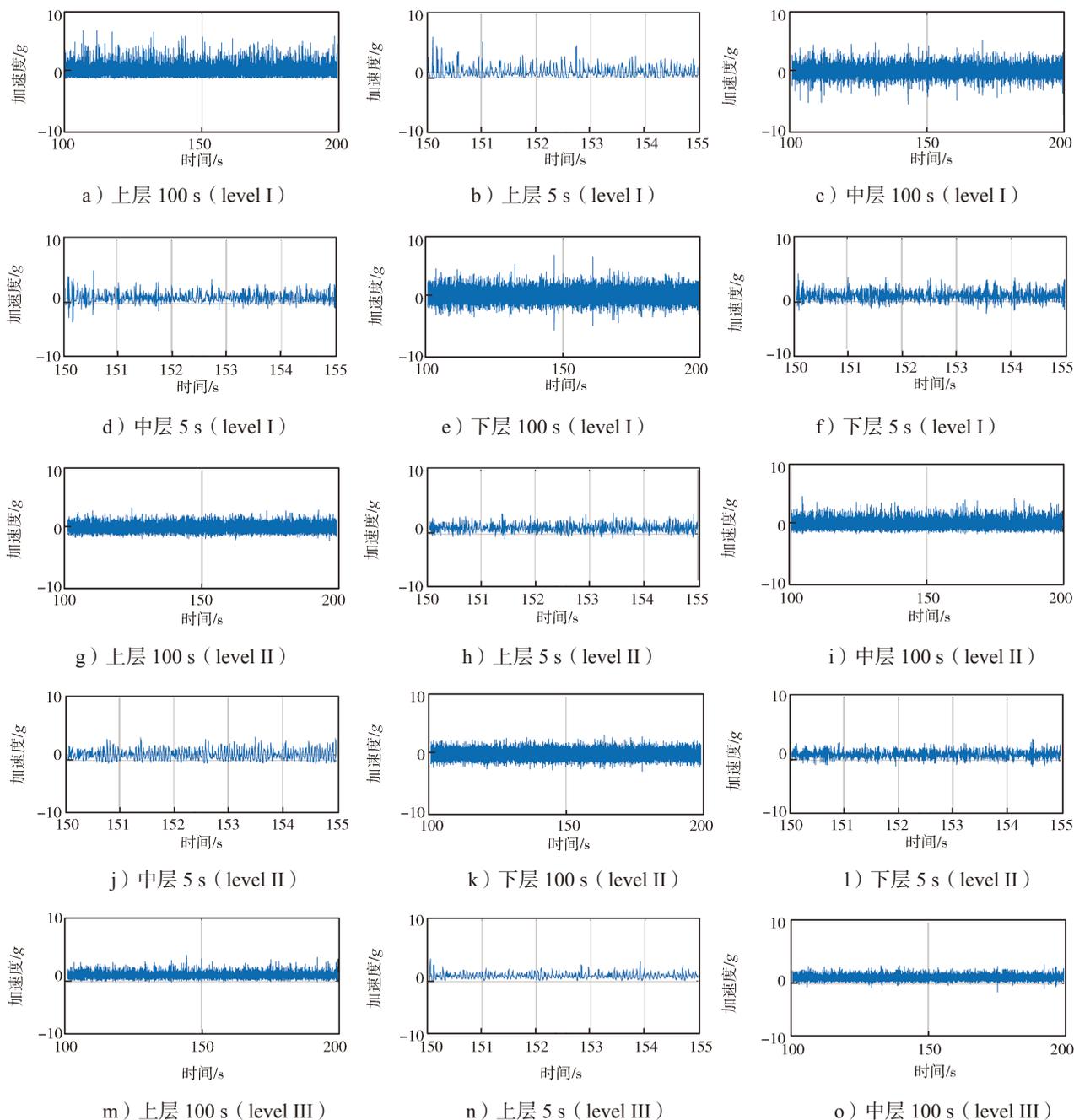
1) 水泥块加速度响应主要受其位置(所处的堆码层数)、约束方式和振动等级的影响。随振动强度(由 level I 到 level III)的减小,各层水泥块正向加速度均明显变小。

2) 无约束且振动强度较大(见图 5a~l)时,上层水泥块的反向加速度在 $-g$ 处有明显的持续过程(自由落体),表明包装件有明显的跳起。中层和下层包装件承受来自其顶部包装件的压力,其运动受到一定限制,水泥块反向加速度在 $-g$ 处无明显的持续

过程,正、反向加速度较为对称。振动强度较小(见图 5m~r)时,上层水泥块的反向加速度大于 $-g$,包装件没有出现跳起现象,中层和下层正、反向加速度较为对称。

3) 弹性约束时,弹性绳对包装件的运动有一定的限制作用。由图 6 可知,上层水泥块反向加速度在 $-g$ 处不再有明显的持续过程(包装件不再有明显的跳起)。

4) 固定约束时,包装件的跳动受到全面限制。由图 7 可知,水泥块加速度响应趋于对称。



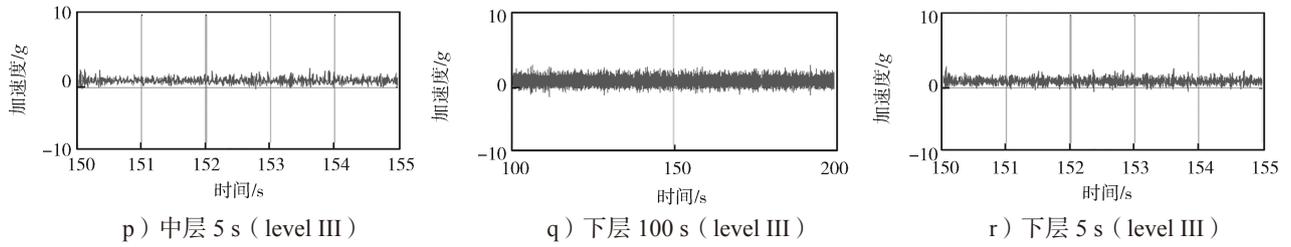


图 5 无约束下水泥块加速度响应的时间历程

Fig. 5 Acceleration response of concrete block under non-constrain

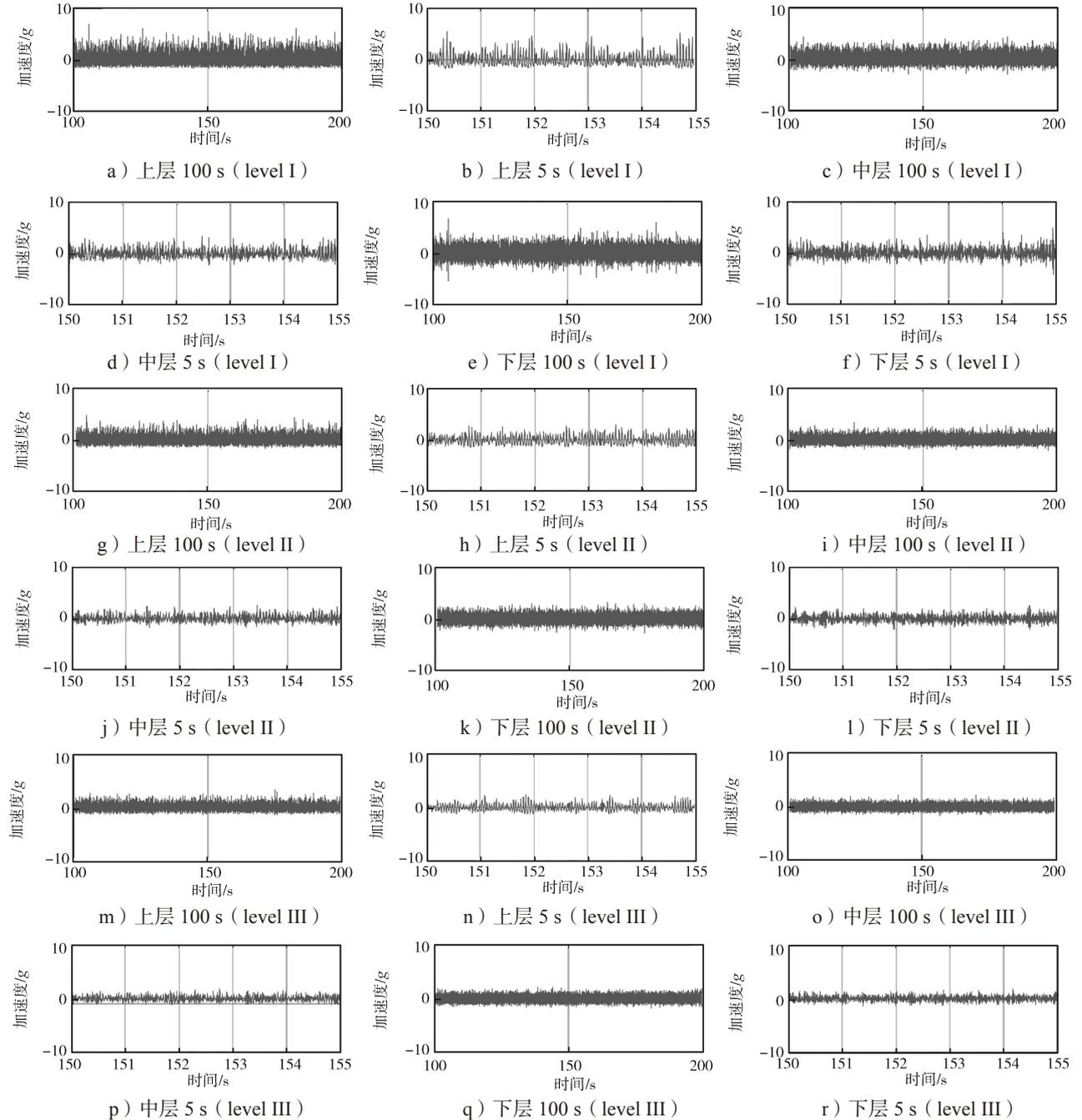


图 6 弹性约束下水泥块加速度响应的时间历程

Fig. 6 Acceleration response of concrete block under elastic constraint

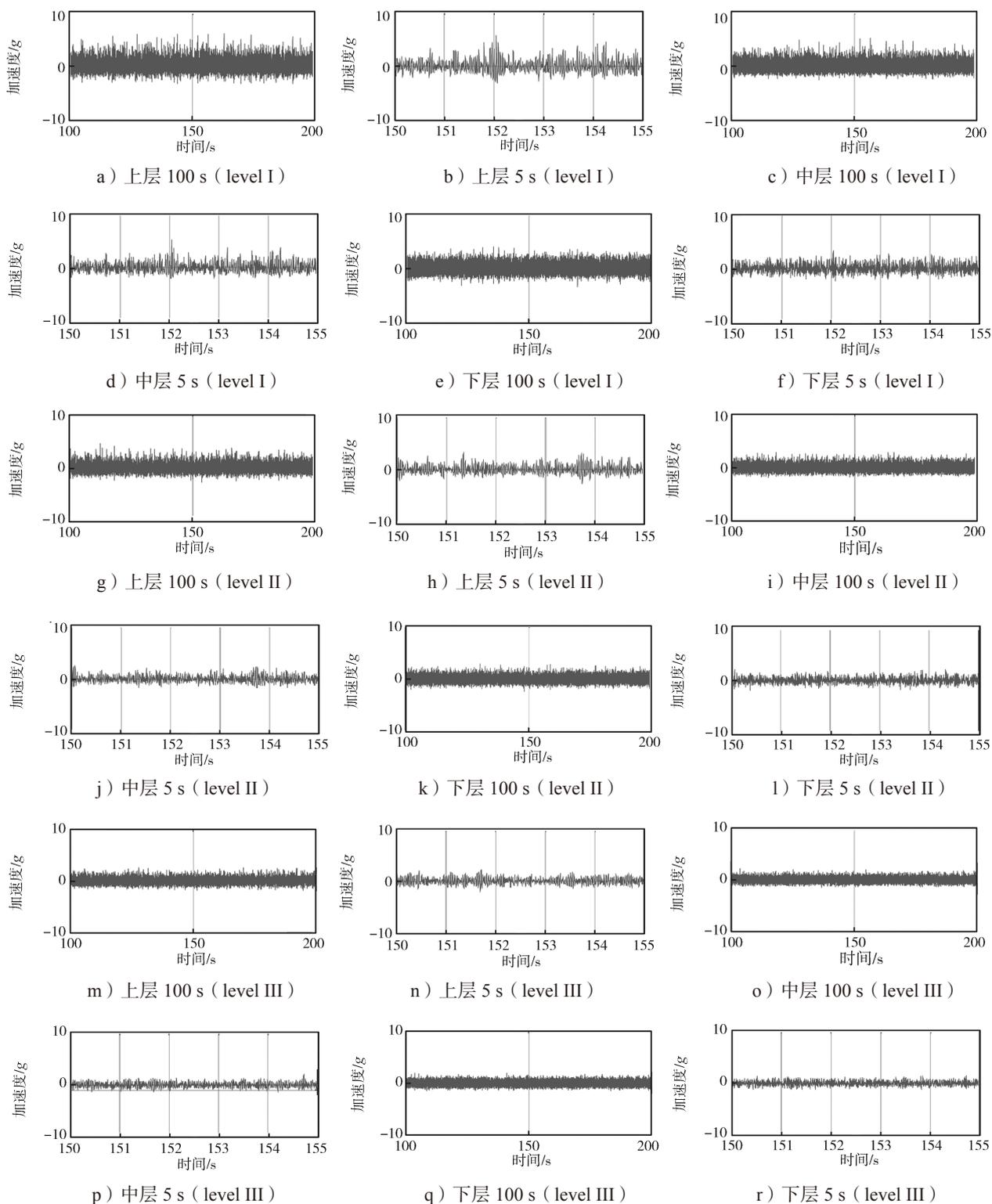


图7 固定约束下水泥块加速度响应的时间历程

Fig. 7 Acceleration response of concrete under fixed constraint

2.3 水泥块加速度响应的概率密度分布

限带白噪声激励下振动台加速度信号的概率密

度分布如图8所示。由图8可知，振动台加速度的概率密度分布符合高斯分布。

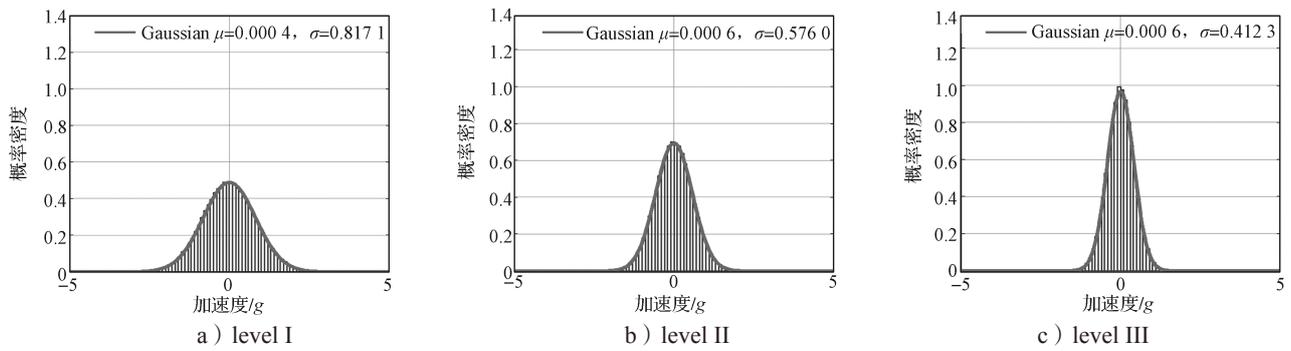


图 8 限带白噪声激励下振动台加速度信号的概率密度分布

Fig. 8 Acceleration of vibration table under band limited white noise PSDs

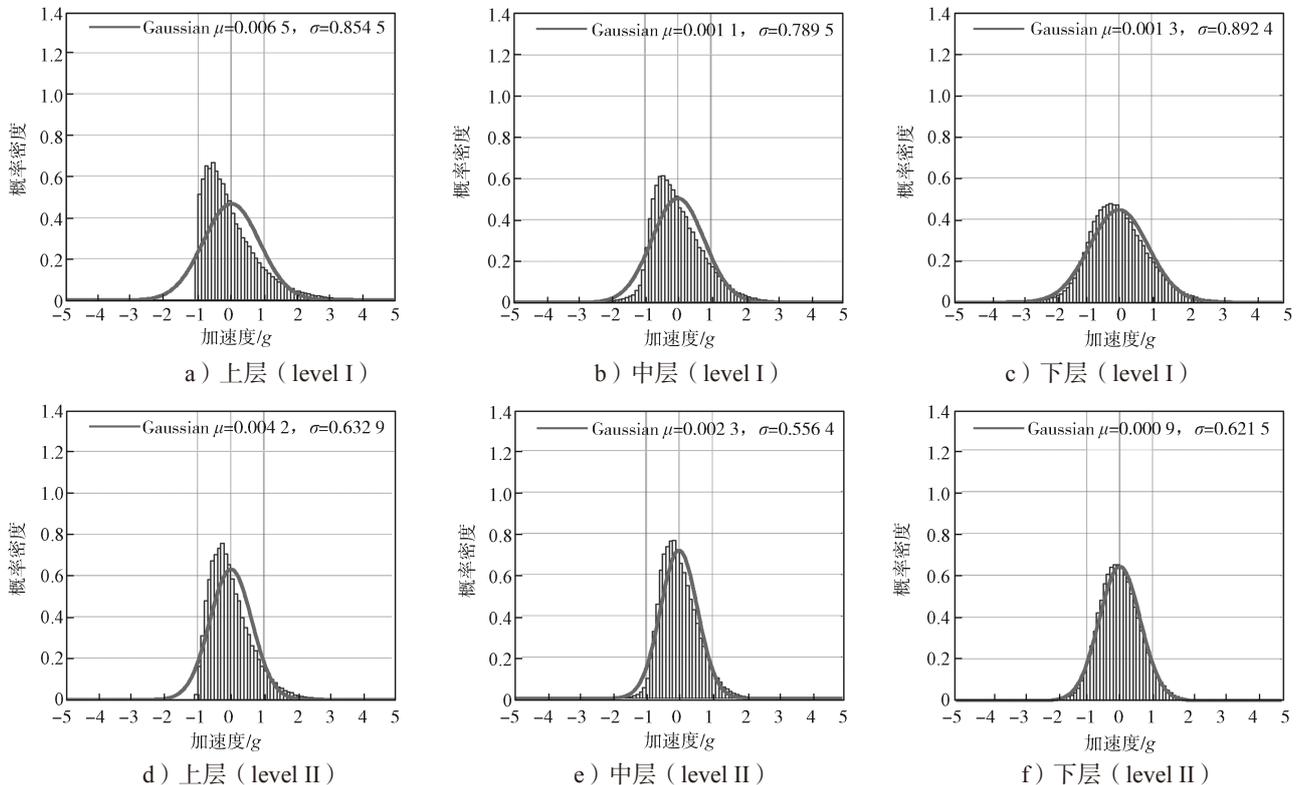
水泥块加速度响应的概率密度分布如图 9~11 所示 (为节省篇幅, 这里仅给出角垫组合为 K-K 时的结果)。总体而言, 堆码包装系统中水泥块加速度响应分布不符合高斯分布。不同试验条件下下层水泥块加速度响应分布基本为高斯分布, 中层水泥块在振动强度较小 (level III) 时, 其加速度分布接近高斯分布, 上层水泥块只有在弹性约束和固定约束下且振动强度较小 (level III) 时, 其加速度响应分布才接近高斯分布。

由图 9 可知:

1) 无约束条件下, 振动强度较高时, 上层水泥块加速度响应的概率密度分布在 $-g$ 处有较大凸起 (见图 9a), 中层水泥块加速度响应的概率密度分布与

高斯分布有一定程度的偏离, 且向左歪斜程度较大, 下层水泥块加速度响应较为接近高斯分布, 但仍有一定的偏离, 这主要是因为随机振动过程中上层包装件有一定跳动, 中、底层水泥块由于受到一定的堆码压力, 运动受到限制, 特别是底层包装件, 基本不发生跳动。

2) 另外随着振动强度的降低 (见图 9g~i), 上层水泥块加速度响应的概率密度分布在 $-g$ 处的凸起减小, 其概率密度分布图逐渐趋于左右对称, 中层水泥块加速度响应的概率密度分布歪斜程度减小, 接近高斯分布, 下层水泥块加速度响应概率密度分布图与高斯分布拟合曲线基本吻合。



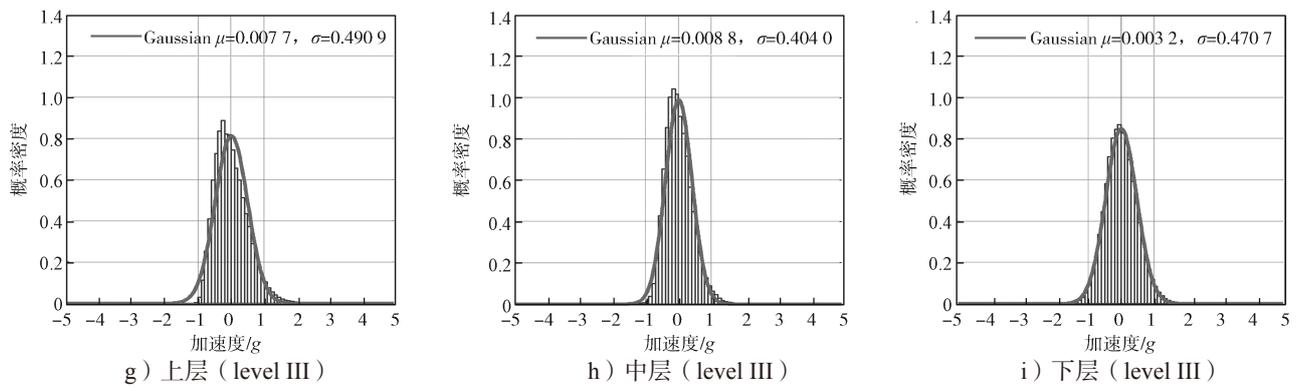


图9 无约束下水泥块加速度响应的概率密度分布图

Fig. 9 Probability density distribution of concrete block response acceleration under non-constrain

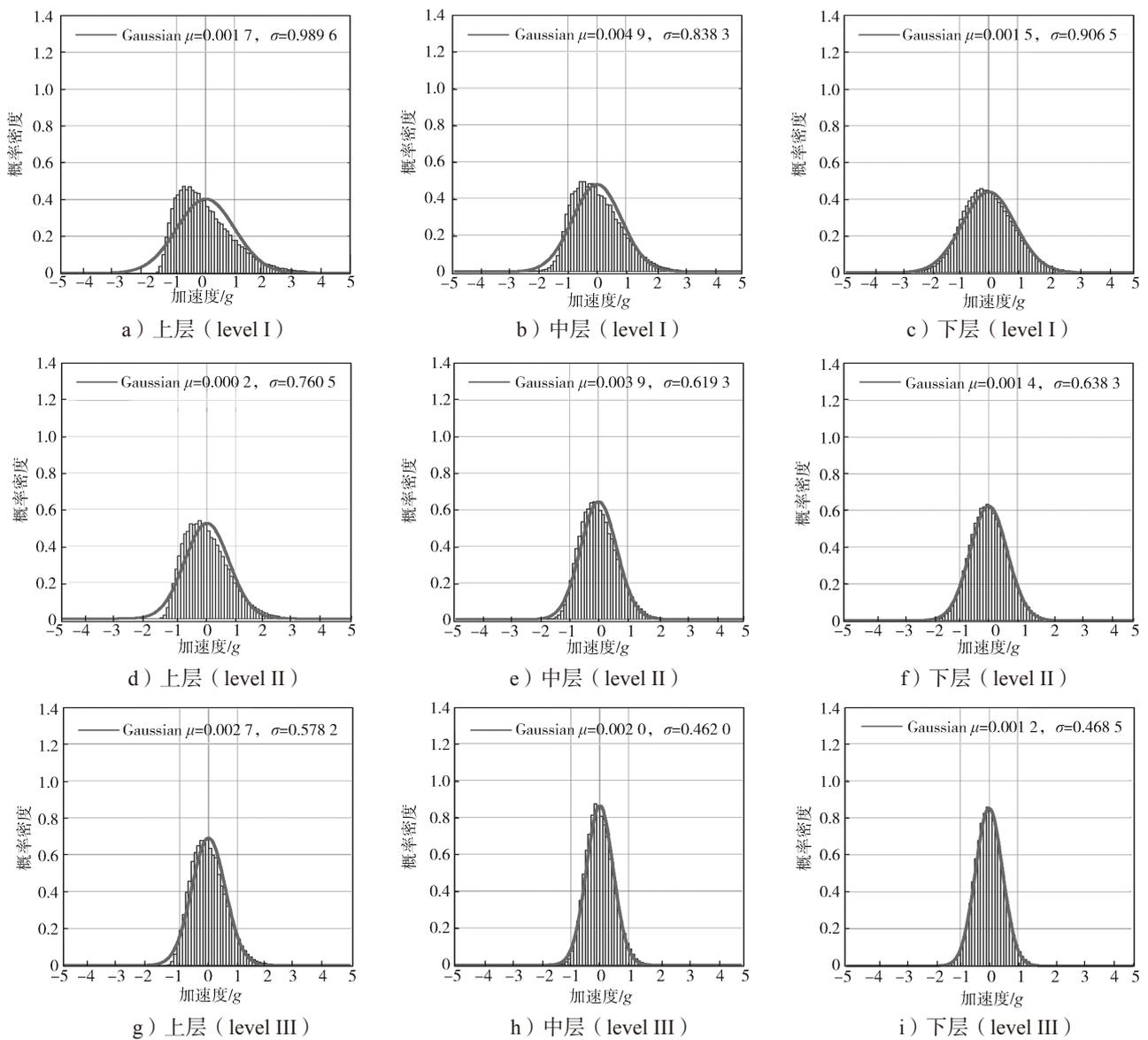


图10 弹性约束下水泥块加速度响应的概率密度分布图

Fig. 10 Probability density distribution of concrete block response acceleration under elastic constraint

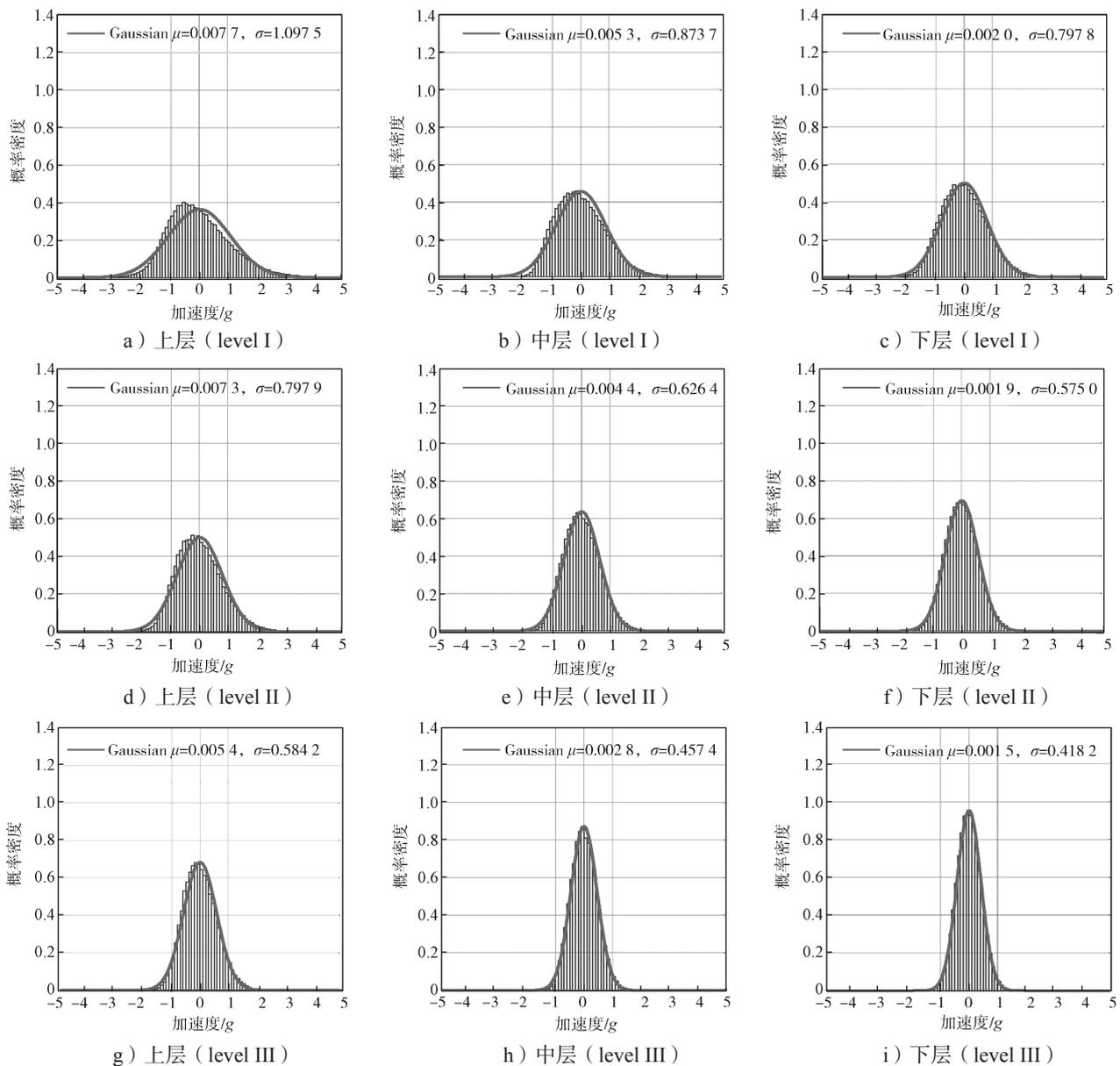


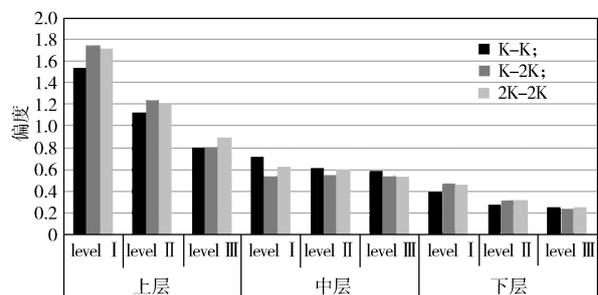
图 11 固定约束下水泥块加速度响应的概率密度分布

Fig. 11 Probability density distribution of concrete block response acceleration under fixed constraint

由图 10 可知: 弹性约束条件下, 当振动强度较大 (见图 10a~f) 时, 上层水泥块加速度响应的概率密度分布与高斯分布偏离程度最大, 中层次之, 底层基本接近高斯分布; 当振动强度较小 (见图 10g~i) 时, 各层水泥块的加速度响应概率密度分布与高斯分布基本吻合。

由图 11 可知: 固定约束时, 包装件跳动受到限制, 各层水泥块加速度响应基本符合高斯分布; 但当振动强度较大 (见图 11a~c) 时, 上层水泥块加速度响应分布与高斯分布仍有一定程度的偏离, 这主要是由缓冲材料在较大变形时产生的非线性引起的。

水泥块加速度响应的偏度、峭度的变化规律如图 12~13 所示, 具体数值见表 3~4。



a) 无约束

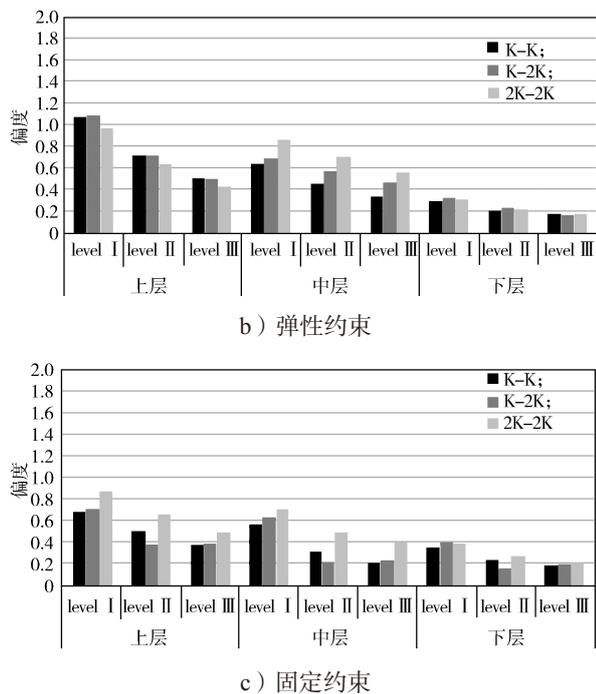


图 12 水泥块加速度响应的偏度值

Fig. 12 Skewness of concrete block response acceleration

由图 12 和表 3 可知：水泥块加速度响应偏度受约束方式、振动强度和所在堆码层数的共同影响；无约束时，水泥块加速度响应的偏度较大，约束后，偏度值明显下降；3 种约束方式下，下层水泥块加速度响应的偏度值都基本接近高斯分布时的偏度值，上层水泥块加速度响应的偏度均随着振动强度的下降而下降。

由图 13 和表 4 可知：水泥块加速度响应的峭度主要受约束方式的影响，无约束时，水泥块加速度响应的峭度值较大，约束后，峭度值明显下降。

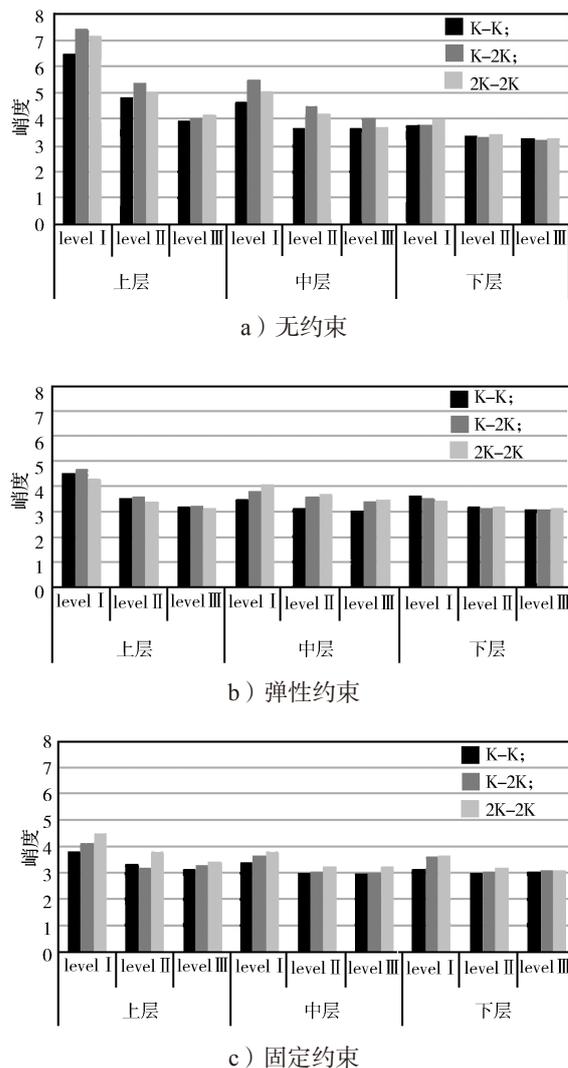


图 13 水泥块加速度响应的峭度值

Fig. 13 Kurtosis of concrete block response acceleration

表 3 水泥块加速度响应的偏度值

Table 3 Skewness of concrete block response acceleration

位置	振动强度	无约束			弹性约束			固定约束		
		K-K	K-2K	2K-2K	K-K	K-2K	2K-2K	K-K	K-2K	2K-2K
上层	level I	1.540 5	1.748 7	1.708 8	1.073 4	1.089 3	0.977 8	0.675 6	0.720 2	0.865 2
	level II	1.123 1	1.247 8	1.208 1	0.719 2	0.711 2	0.636 7	0.499 6	0.336 4	0.657 3
	level III	0.800 1	0.813 4	0.898 6	0.506 4	0.494 9	0.438 8	0.375 9	0.391 3	0.498 5
中层	level I	0.719 6	0.547 8	0.623 2	0.643 2	0.690 2	0.867 3	0.559 7	0.631 1	0.705 8
	level II	0.617 5	0.555 4	0.606 9	0.458 3	0.571 1	0.698 1	0.318 3	0.218 4	0.490 5
	level III	0.591 7	0.539 7	0.535 6	0.338 6	0.470 9	0.561 0	0.212 1	0.239 3	0.396 6
下层	level I	0.394 8	0.479 0	0.465 8	0.289 9	0.331 2	0.321 1	0.347 4	0.396 2	0.387 7
	level II	0.273 7	0.325 4	0.324 1	0.212 0	0.230 7	0.223 2	0.234 4	0.167 0	0.270 2
	level III	0.256 4	0.243 9	0.250 2	0.171 1	0.169 6	0.174 1	0.186 1	0.199 4	0.217 4

表 4 水泥块加速度响应的峭度值

Table 4 Kurtosis of concrete block response acceleration

位置	振动强度	无约束			弹性约束			固定约束		
		K-K	K-2K	2K-2K	K-K	K-2K	2K-2K	K-K	K-2K	2K-2K
上层	level I	6.444 2	7.466 1	7.173 8	4.511 8	4.667 9	4.269 9	3.783 3	4.132 6	4.514 8
	level II	4.828 2	5.372 7	5.011 1	3.549 0	3.562 6	3.370 9	3.320 4	3.202 8	3.801 9
	level III	3.923 2	4.029 4	4.184 9	3.191 8	3.212 2	3.128 5	3.136 6	3.289 7	3.428 9
中层	level I	4.630 1	5.498 6	5.077 3	3.469 7	3.839 7	4.071 8	3.385 5	3.666 8	3.785 5
	level II	3.657 3	4.521 4	4.198 7	3.157 2	3.588 1	3.703 4	2.992 6	3.028 4	3.255 0
	level III	3.650 4	4.079 6	3.685 1	3.055 8	3.433 0	3.471 3	2.951 2	2.995 1	3.246 9
下层	level I	3.789 9	3.812 8	3.963 9	3.657 6	3.514 2	3.442 2	3.121 0	3.594 4	3.652 2
	level II	3.394 8	3.324 0	3.409 7	3.177 8	3.158 6	3.165 0	3.008 8	3.033 3	3.198 5
	level III	3.259 2	3.229 4	3.290 4	3.068 9	3.090 6	3.122 0	3.030 7	3.093 5	3.117 5

3 结论

本文研究了随机振动下三层堆码包装产品加速度响应的时域、频域和非高斯特征。通过随机振动试验,得到三层堆码包装产品加速度响应的 PSD 曲线、时间历程及概率密度分布。试验结果表明:

1) 高斯振动激励下,包装件的跳动是引起其内装产品加速度响应呈现非高斯特征的主要原因。无约束条件下,三层堆码包装系统中上层包装件出现明显跳动,水泥块加速度响应概率密度分布呈现明显的非高斯特征,中层和下层包装件加速度响应较为接近高斯分布。随着约束的增强,包装件跳动受到限制,水泥块加速度响应的概率密度分布与高斯分布偏离程度逐渐减小。固定约束时,各层水泥块加速度响应基本符合高斯分布;但振动强度较大时,由于缓冲材料在较大变形时产生的非线性,上层水泥块加速度响应的概率密度分布与高斯分布仍有一定的偏离。

2) 在三层堆码包装系统中,水泥块加速度响应 PSD 主要受振动等级、约束方式和所在堆码层数的影响。同一堆码层数和约束方式下,随着振动强度的下降,加速度响应 PSD 明显下降,共振频率明显增大。上层水泥块的加速度功率谱主要受一阶共振频率控制,中层水泥块的加速度功率谱受一阶和二阶共振频率共同控制,下层包装件的加速度功率谱主要由第三阶共振频率控制。

参考文献:

[1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 2版. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 25-53.
PENG Guoxun. Logistics and Transport Packaging Design[M]. 2nd ed. Beijing: Printing Press, 2012: 25-

53.
[2] 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: [s. n.], 1997: 1-12.
[3] 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 Jun, WANG Zhiwei. Combined Shock Spectrum of Linear Stacking Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 106-107.
[4] 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.
[5] 王 军, 卢立新, 王志伟. 三次非线性多层堆码包装系统关键部件三维组合冲击谱研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 188-190.
WANG Jun, LU Lixin, WANG Zhiwei. 3-D Combined Shock Response Spectrum of a Cubic Nonlinear Stracked Packaging System with Critical Components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 188-190.
[6] 杨晓谦. 运输过程中堆码包装件的碰撞分析[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
YANG Xiaqian. The Analysis of Collision of Stacking Package in the Transportation Process[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
[7] BERNAD C, LASPALAS A, GONZÁLEZ D, et al. Dynamic Study of Stacked Packaging Units by Operational Modal Analysis[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 23(3): 121-133.
[8] URBANIK T J. Force Plate for Corrugated Container

- Vibration Tests[J]. Journal of Testing & Evaluation, 1990, 18(5): 359-362.
- [9] GODSHALL W D. Frequency Response, Damping and Transmissibility Characteristics of Top Loaded Corrugated Containers[R]. Research Paper FPL 160. [S. l.]: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1971.
- [10] 陈倩, 甘春标, 郭云松. 一类受随机激励的强非线性包装振动系统的随机平均[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 1-3.
CHEN Qian, GAN Chunbiao, GUO Yunsong. Stochastic Averaging of a Strongly Nonlinear Packaging Oscillatory System Under Stochastic[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(7): 1-3.
- [11] 林深伟. 随机振动下产品包装件的动态响应研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
LIN Shenwei. Experimental Investigation of Dynamic Response of Packaged Product in Random Vibration[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [12] 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: [s. n.], 2000.
- [13] JAMIALAHMADI A, TROST T, ÖSTLUND S. A Proposed Tool to Determine Dynamic Load Distribution Between Corrugated Boxes[J]. Packaging Technology & Science, 2011, 24(6): 317-329.
- [14] WANG Z W, FANG K, WANG L J, et al. Dynamic Load Distribution of Stacked Packaging Unit Subjected to Vertical Vibration by Using a Pressure-Mapping System[EB/OL]. [2017-06-04]. <http://www.iapriweb.org/>.
- [15] WANG Z W, FANG K. Dynamic Performance of Stacked Packaging Units[J]. Packaging Technology & Science, 2016, 29(10): 491-511.
- [16] 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.
- [17] FANG K, WANG Z W. The Statistical Characteristics of Maxima of Contact Force in Stacked Packaging Units Under Random Vibration[J]. Packaging Technology & Science, 2017. doi: 10.1002/pts.2313.
- [18] WANG Z W, WANG L J. On Accelerated Random Vibration Testing of Product Based on Component Acceleration RMS-Life Curve[J]. Journal of Vibration & Control, 2017. doi: 10.1177/1077546317705555.
- [19] WANG Z W, WANG L J. Accelerated Random Vibration Testing of Transport Packaging System Based on Acceleration PSD[J]. Packaging Technology & Science, 2017. doi: 10.1002/pts.2306.

Non-Gaussian Feature of Product Response in Stacked Packaging Unit

LIU Yuanzhen^{1,2,3}, WANG Zhiwei^{1,2,3}

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

Abstract: The non-Gaussian characteristics of product response in three-layer stacked packaging unit in random vibration were studied, and the reasons for non-Gaussian response were discussed. The results showed that, in the case of unconstrained condition, a jumping happened in the top packaging layer, and the probability density of product acceleration response was of non-Gaussian distribution. The probability density of acceleration response of product in middle layer had a certain deviation from Gaussian distribution, while the acceleration response of bottom product was close to Gaussian distribution. In the case of elastic constraint, the probability density of product acceleration response in the top packaging layer had a significant deviation from Gaussian distribution when the vibration intensity was greater. In the case of fixed constraint, the acceleration response of all products was consistent with Gaussian distribution.

Keywords: stacked packaging; non-Gaussian; random vibration; kurtosis; skewness