

MapleSim 在振动仿真中的应用

王丽丽, 赵冬菁, 仲晨
(曲阜师范大学, 日照 276826)

摘要: **目的** 利用 MapleSim 软件, 探究数值-符号仿真应用于包装振动领域的可行性。**方法** 首先, 根据单自由度振动模型构建并验证理论状态下的单层负载振动模型; 在此基础上提出可应用于随机振动的仿真模型, 进一步研究仿真关键参数的计算方法; 最后进行随机振动试验, 将试验与仿真结果进行对比与分析。**结果** PSD 分析表明, 不论中间还是角落位置, 仿真 PSD 与实验 PSD 的变化趋势一致, 但仿真 PSD 在低频 (10~40 Hz) 下会产生一定的误差, 该误差对于角落振动的情况更为显著; G_{rms} 值的对比表明仿真误差小于 10%。**结论** 基于 MapleSim 的数值-符号仿真模型能够反映真实振动, 该方法应用于随机振动具有可行性及可信度, 但文中方法尚存在仿真误差, 需进一步优化仿真关键参数的计算方法。

关键词: 振动; 仿真; 运输包装; MapleSim

中图分类号: TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0024-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.005

Application of MapleSim in Vibration Simulation

WANG Li-li, ZHAO Dong-jing, ZHONG Chen
(Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the feasibility of numerical-symbol simulation applied in packaging vibration field with the MapleSim software. First, based on the vibration model with the single degree of freedom, a single layer load vibration model was theoretically built and verified. On this basis, a simulation model that could be applied in random vibration was proposed. Furthermore, the calculating method of the simulated key parameters was studied. Finally, the random vibration test was carried out to compare and analyze the experimental and simulation results. PSD analysis showed that the change tendency of simulation PSD and experimental PSD was consistent whether they were in the middle or at the corners. However, the simulation PSD would have some error at low frequency (10~40 Hz), which was more significant for the corner vibration case. Moreover, the G_{rms} value comparison showed that the simulation error was smaller than 10%. The numerical-symbol simulation model based on MapleSim can reflect the real vibration. This simulation method is feasible and reliable for random vibration. The calculating method of the simulated key parameters should be further studied because the proposed method causes some simulation error.

KEY WORDS: vibration; simulation; transportation package; MapleSim

根据使用目的的不同, 商品包装分为销售包装和运输包装。运输包装作为物流环节中保护产品的重要手段, 无论在物流行业还是包装领域都占有十分重要的地位。就运输包装而言, 保护性是其最为重要的指标。为确保运输包装在实际流通环境中具备足够的保护性能, 包装性能测试是运输包装设计不可或缺

的重要环节。

目前常用的运输包装性能测试方法有传统实验室试验及计算机仿真。前者可获得较为准确可靠的实验数据, 但经济及时间成本不佳; 相比而言, 后者以高效、快捷见长, 如 Ansys^[1-2], LS-DYNA^[3-5]及 Abaqus^[6]等仿真软件被越来越多地应用到包装领域。

收稿日期: 2018-02-25

基金项目: 曲阜师范大学校级科研项目 (xkj201501)

作者简介: 王丽丽 (1992—), 女, 曲阜师范大学硕士生, 主攻运输包装和包装仿真。

通信作者: 仲晨 (1979—), 男, 博士, 曲阜师范大学副教授, 主要研究方向为运输包装和包装结构设计。

目前的包装动力学仿真大多均基于有限元算法, 仿真思路较为单一。相对有限元算法, 数值-符号法是另一种仿真算法。基于数值-符号算法的计算机仿真已被广泛应用于航空航天、船舶制造等多个领域^[7-10], 但其在包装领域的应用实例还鲜有报道。

针对运输环境中造成产品破损的两大动力学诱因——冲击和振动, 运输包装的保护性具有两大内涵, 即缓冲性能和减振性能。振动易对包装及内装物造成持续的累积损伤, 包装的减振研究一直是包装领域的经典课题。文中利用基于数值-符号算法的仿真软件 MapleSim[®] (加拿大 Maplesoft 公司, Waterloo 市), 研究数值-符号算法用于包装振动仿真的可行性和可信度, 以期能为包装振动测试提供新思路; 通过实验室试验提出该仿真方法应用于实践的参数计算方法, 明确实际振动与模型仿真结果间的差异。

1 MapleSim 的仿真思路

有限元仿真步骤^[11]可分为几何建模→网格划分→材料属性定义→边界条件定义→仿真→查看结果, 而 MapleSim 的仿真思路和有限元有较大差别。MapleSim 仿真步骤^[12]可概括为元件选择 (或自定义)→组件模型→参数定义→仿真→查看结果。

元件是 MapleSim 仿真的基础, 就包装仿真而言, 常用元件如质量块、阻尼弹簧等可直接调用 MapleSim 的内建元件库; 对于非线性包装材料组件, 可利用 MapleSim 的自定义元件功能实现。在选定或定义好必需的元件后, 基于数学模型可通过尝试不同的连接方式构建仿真模型。根据元件种类不同, 各元件具有不同的参数。参数计算是 MapleSim 仿真的关键步骤, MapleSim 的仿真结果以某物理量 (如加速度、速度、位移等) 的时间序列曲线表示。

2 单层振动仿真模型的构建与验证

2.1 负载模型及仿真模型的构建

运输车辆行进过程中, 由于路面不平整等因素产生的振动经车轮等传递给包装件, 此时包装件受到的振动为典型的强迫振动, 见图 1a, 这一振动可简化为基于位移激励的单自由度强迫振动模型, 见图 1b。该模型由激励信号 I、缓冲结构 II 和内装物 III 组成, 包装件内的产品简化为质量块。包装件及缓冲结构视为线性弹簧和衰减器的组合。

基于数学模型构建 MapleSim (Ver.4.0) 振动仿真模型, 见图 2。元件 i 和 ii 分别为输入脉冲和机械位移, 两者共同定义了模型的位移激励信号, 用以对应图 1b 中的 I。元件 iii 和 iv 分别为弹簧阻尼和质量块, 分别对应图 1b 中的 II 和 III。元件 Probe 为探针组件, 用于反馈仿真结果。考虑到负载模型为单自由

度, 仿真模型中各元件采用串联方式连接。

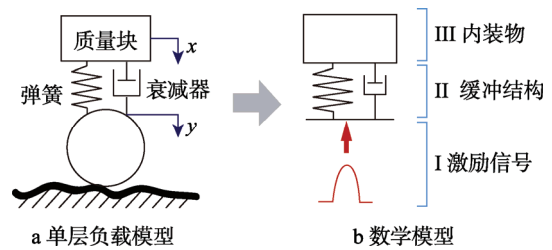


图 1 单层负载模型

Fig.1 Single layer loading model

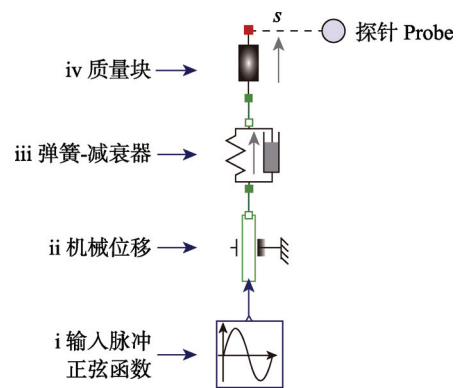


图 2 单层振动仿真模型

Fig.2 Simulation model of single layer vibration

2.2 仿真模型的验证

为验证 MapleSim 振动仿真模型的可靠性, 文中进行振动模型的数学解和仿真结果的对比分析。验证分析过程中, 涉及到的相关参数均为依据经验设定的理论假设值。模型的位移激励设为正弦波。

2.2.1 振动模型的数学解

针对数学模型, 相关参数设定如下: 正弦波激励的振幅 $A=10\text{ mm}$; 弹簧常数 $k=100\text{ kN/m}$; 衰减系数 $d=160\text{ (N}\cdot\text{s)/m}$; 内装物质量 $m=10\text{ kg}$ 。

由振动理论^[13]可知, 强迫振动的数学解由瞬态解和稳态解组成, 通常仅考虑稳态解。

系统固有频率 f_n 的计算方法为:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

将 k 和 m 代入式 (1) 可得 $f_n=15.9\text{ Hz}$ 。

系统衰减率 ξ 的计算方法为:

$$\xi = \frac{d}{2 \cdot 2\pi f_n \cdot m} \quad (2)$$

将 f_n 和 d 代入式 (2), 可得 $\xi=0.08$ 。

频率比 λ 被定义为系统的激励频率 f 与固有频率 f_n 之比, 即 $\lambda=f/f_n$ 。理论上, 若 k 和 d 不变, 则系统的固有频率 f_n 恒定; 不断改变激励频率 f , 则会得到一系列频率比 λ 。

位移激励系统的振动传递率 (动力放大因子) T_r

的计算方法为:

$$T_r = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (3)$$

将 ξ 与相应的一系列 λ 代入式(3),即可得一系列对应的 T_r ,从而得到 $\xi=0.08$ 时系统对应的振动传递率曲线。

为方便与后期仿真试验结果的比对,将 λ 取特定数值0.10, 0.15, 1.00, 3.00和10.00,解出不同 λ 对应的 T_r ,归纳见表1。

表1 T_r 数学解($\xi=0.08$)
Tab.1 Mathematical solution of T_r ($\xi=0.08$)

λ	T_r 数学解
0.10	1.01
0.15	1.33
1.00	6.33
3.00	0.14
10.00	0.02

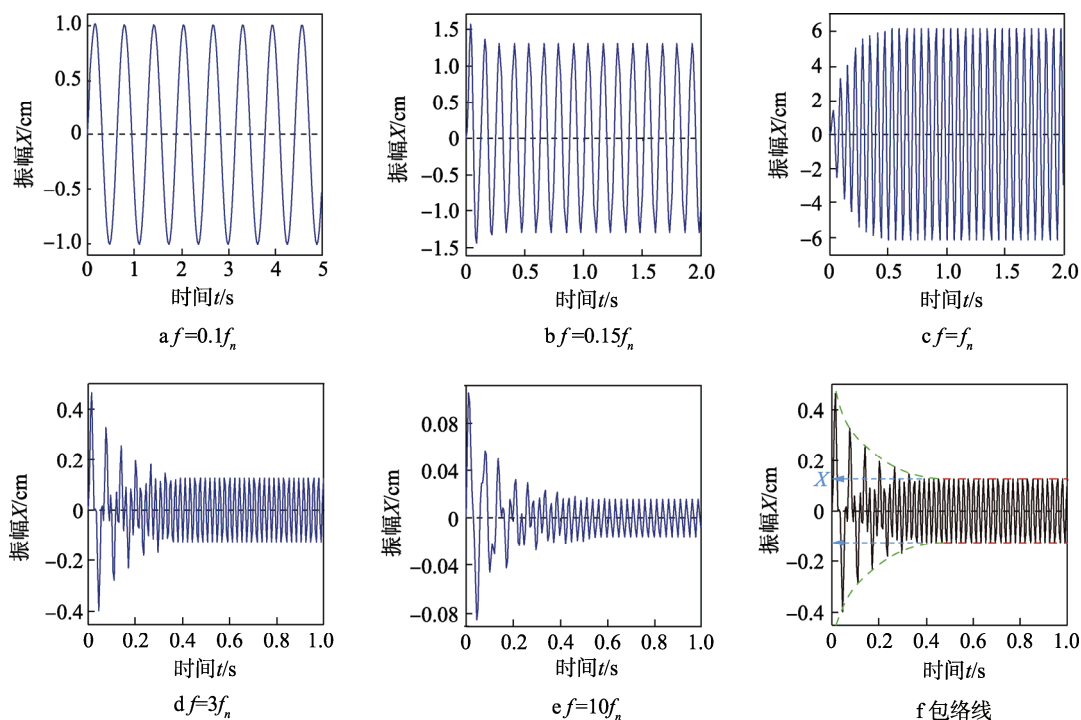


图3 单层振动仿真结果

Fig.3 Simulation results of single layer vibration

表2 T_r 仿真值
Tab.2 Simulation value of T_r

λ	仿真解 X/mm	激励振幅 A/mm	T_r 仿真值
0.10	10.1		1.01
0.15	13.3		1.33
1.00	63.3	10	6.33
3.00	1.4		0.14
10.00	0.2		0.02

2.2.2 振动模型的仿真结果

将2.2.1节中预设的参数 A , k , d 及 m 分别输入图2的仿真模型各组件中,并依据表1中的频率比 λ ,根据 $\lambda=f/f_n$ 将正弦波元件中的激励频率 f 分别设为 $0.1f_n$, $0.15f_n$, f_n , $3f_n$ 及 $10f_n$,从而得到系统在不同激励频率下的响应。

仿真结果见图3,横坐标为时间,纵坐标为响应振幅。在 $f < f_n$ 时(图3a—b),系统处于耦合区,强迫振动的振幅接近输入值;在 $f \approx f_n$ 时(图3c),系统处于共振区,振幅被显著放大;在 $f > f_n$ 时(图3d—f),系统处于衰减区,响应振幅较小。尽管激励频率不同,系统的响应不同,但每个仿真的响应波形(即仿真解)均可分为两部分,即弧形包络线部分和平直包络线部分(图3f),它们分别对应振动系统的瞬态解和稳态解。稳态解峰值 X 可视为系统的仿真解,根据 T_r 定义可知, $T_r=X/A$,故不同 λ 下的 T_r 值归纳见表2。

对比表1—2相同 λ 下的 T_r 值可知,根据仿真结果计算的 T_r 值与 T_r 的数学解一致。可见,图2的MapleSim仿真模型能够准确地反映物理系统的振动情况,从而在理论上验证了其正确性。

3 MapleSim 仿真在随机振动中的应用

随机振动是包装件在实际流通过程中经历的常态振动。这里进一步讨论将MapleSim振动仿真模型应用于实际随机振动的可行性,并通过对比实际振动

试验结果与仿真结果,探究仿真模型中关键参数的计算方法。

3.1 随机振动试验设计

随机振动试验设计为模拟果蔬运输包装。实验样品设计为 0432 型水果箱,其尺寸为 420 mm×270 mm×120 mm,见图 4。材料为 B 楞瓦楞纸板,其定量为 200/120/200 g/m²,果蔬模拟物使用黏土块。实验样品包装件总质量为 2.245 kg。试验设备使用电气试验振动系统 DC 600-62 (苏州苏轼试验设备有限公司)。依据“GB/T 4857.23 包装 运输包装件基本试验第 23 部分:随机振动试验方法”进行测试^[14]。试验参数设置如下:振动频率范围为 5^[15]~100 Hz;激励为功率谱密度(PSD)输入信号;加速度水平为 0.1g;振动时间设置为 10 min。为便于后续对比,随机振动试验的 PSD 曲线设为功率谱密度等于 0.01 g²/Hz 的水平直线。试验时用尼龙绳将实验样品固定于振动台正上方以模拟包装堆码的底层振动。为比较包装件不同位置的振动响应,将加速度传感器固定于纸箱角落和中间位置,分别进行 5 次重复试验。

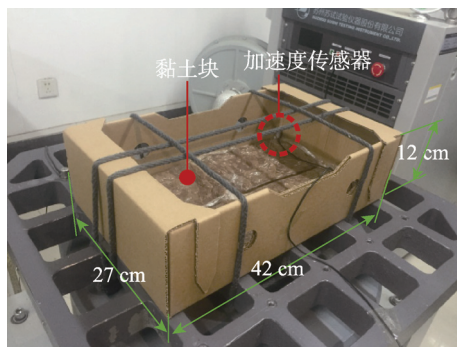


图 4 试验场景
Fig.4 Test scenario

随机振动试验结果见图 5。经分析可知,果蔬箱角落位置的振动响应基本呈直线状态,这一结果和激励 PSD 曲线基本一致,可知果蔬箱角落振动为耦合振动,此处的减振效果不佳。果蔬箱中间位置的振动 PSD 在 10~40 Hz 频带内处于放大区,振动较为明显,而这一频带是公路运输的高能量区域之一,因箱面中间部位来自如楞边、襟片等箱体结构的约束力较弱,致使箱面中间部位较箱面边缘的刚性降低,弹性变强所致。

3.2 随机振动仿真模型

考虑到随机振动中的外部激励信号通常以加速度的形式表示,故随机振动仿真模型需在图 2 模型的基础上进行改进,改进后模型见图 6。与图 2 的模型相比,图 6 模型下部的信号输入模块进行了变更。图 2 中的位移元件改为图 6 的加速度元件,图 2 中的半正弦脉冲元件变为图 6 的时间序列元件,以导入实际的加速度-时间数据。

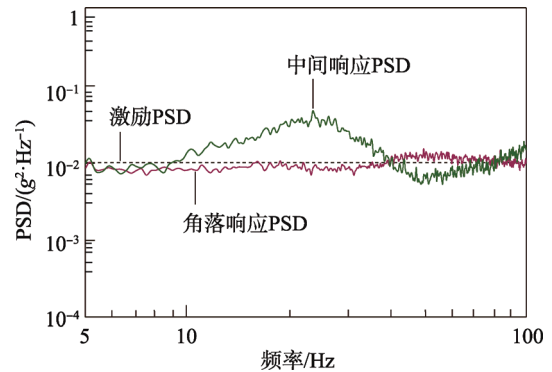


图 5 随机振动实验的响应 PSD 曲线
Fig. 5 Response PSD curves of the random vibration test

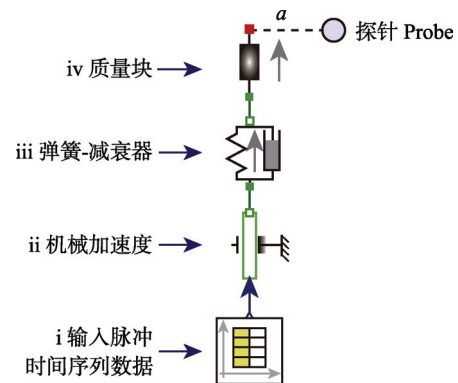


图 6 应用于随机振动的仿真模型
Fig.6 Simulation model applied in the random vibration

3.3 仿真模型关键参数的计算

激励波形直接影响振动响应,另外,弹簧常数 k 和衰减系数 d 直接反映材料的缓冲性能,因此图 6 模型的关键参数包括实际激励信号及参数 k 和 d 。

3.3.1 激励信号的转换

MapleSim 是基于时间进行仿真,随机振动试验中使用的 PSD 数据无法直接应用于仿真模型。由此,首先使用 Matlab[®] (美国 MathWorks 公司,马萨诸塞州,Ver.2014) 将 3.1 节中随机振动试验的激励 PSD 曲线转换为加速度-时间曲线,见图 7,转换时峭度^[16]设为 3。

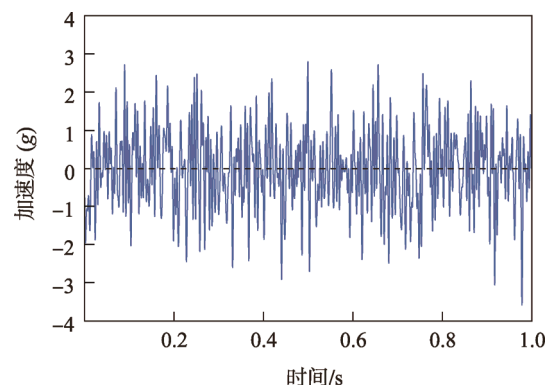


图 7 仿真模型的激励信号(局部)
Fig.7 Excitation signal of simulation model (partial data)

3.3.2 参数 k 和 d 的计算流程

在 2.2 节中, 参数 k 和 d 的数值根据经验直接给出, 但在实际振动系统中这些参数均由真实包装件具体决定。这里提出参数 k 和 d 的计算流程, 见图 8, 共分为 3 步, 即基本数据采集, k 的计算, d 的计算。通过称量及振动试验获取质量 m 、包装件固有频率 f_n 及 T_{rmax} (T_r 曲线的峰值), 然后在该基础上利用相关公式分别计算 k 和 d 。

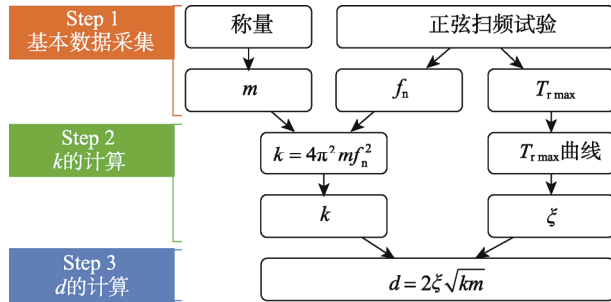


图 8 参数 k 和 d 计算流程

Fig.8 Calculation flowchart of the parameters k and d

首先对图 4 中的实验样品进行正弦扫频试验以确定包装件的 f_n 及 T_{rmax} 。试验依据“GB/T 4857.10 包装 运输包装件基本试验第 10 部分: 正弦变频振动试验方法”^[17]。试验参数如下: 扫频范围为 5~100 Hz, 振动加速度水平设为 0.1g; 初始扫频方向向上; 扫频速率设为每分钟 0.5 倍频程。正弦扫频试验所得实验样品的 f_n 及 T_{rmax} 结果见表 3。

表 3 基于正弦扫频试验的 f_n 与 T_{rmax} 值
Tab.3 f_n and T_{rmax} values based on the sinusoidal sweep test

位置	f_n/Hz	T_{rmax}
中间	34.9	1.7
角落	37.2	1.5

由式 (1) 变形可得式 (4):

$$k = 4\pi^2 m f_n^2 \quad (4)$$

将表 3 中数据和 $m=2.245 \text{ kg}$ 代入式 (4), 计算所得中间和角落位置的 k 值分别为 107 965, 122 445 N/m。

由振动学知识可知, 当 ξ 取不同值时得到 T_r - λ 曲线簇。对于每一条 T_r - λ 曲线均对应一个 T_{rmax} , T_{rmax} 与 ξ 间的关系可表示为:

$$T_{rmax} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (5)$$

T_{rmax} 与 ξ 的理想关系曲线见图 9。利用图 9 进行曲线拟合, 可得给定 T_{rmax} 对应的 ξ 值。另外, 由式 (1—2) 联合变形后得到 d 的计算公式为:

$$d = 2\xi\sqrt{km} \quad (6)$$

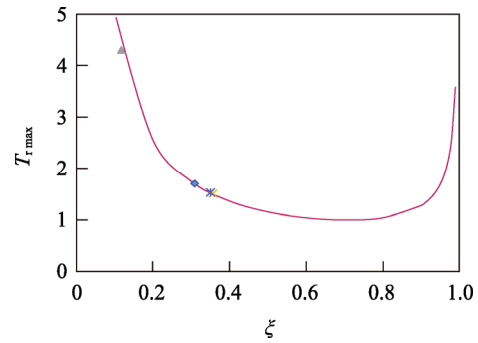


图 9 T_{rmax} - ξ 曲线

Fig.9 T_{rmax} - ξ curve

将所得 m , k 及 ξ 值代入式 (6), 则可计算出 d 值, d 值的计算结果见表 4。

表 4 ξ 及 d 值
Tab.4 ξ and d values

位置	ξ	$d/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
中间	0.31	305
角落	0.36	374

3.4 随机振动仿真

将上述参数分别输入图 6 的振动仿真模型后进行仿真, 仿真时间设为 10 min, 得到相应的加速度-时间曲线。该曲线与图 7 曲线相似, 具有明显随机性。

3.5 数据处理与分析

由于随机振动仿真结果为加速度-时间曲线, 故首先利用 Matlab 将其转换为 PSD 曲线。实验室随机振动试验与仿真结果的 PSD 曲线见图 10, 实验 PSD 及仿真 PSD 曲线对应的 G_{rms} (振动加速度均方根) 值见表 5。

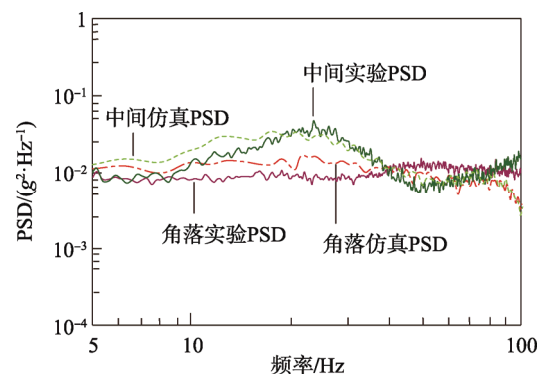


图 10 仿真与实验的 PSD 对比

Fig.10 Comparison of PSDs between simulation and experiment

表 5 实验与仿真 G_{rms} 值对比
Tab.5 Comparison of G_{rms} between simulation and experiments

位置	$G_{rms}(g)$		仿真误差/%
	实验	仿真	
中间	1.09	1.10	10
角落	1.07	1.09	9

通过对比图 10 中仿真与实验 PSD 曲线及表 5 中数据可知: 不论中间还是角落位置, 仿真 PSD 曲线与实验 PSD 曲线的变化趋势呈一致性, 即当振动频率小于 40 Hz 左右时仿真 PSD 表现出振动放大, 当振动频率大于 40 Hz 左右时振动呈衰减现象; 仿真与实验的振动响应 G_{rms} 值接近, 误差不超过 10%; 仿真 PSD 随振动频率的增加, 整体呈下降趋势, 这一趋势导致仿真 PSD 在低频(10~40 Hz)时与实验 PSD 产生拟合误差, 该误差对角落振动的影响更为显著。

对比可知, 整体上仿真模型可以反映实际随机振动实验, 但在低频区域存在仿真误差。究其原因, 应与仿真模型中的 k 及 d 设置为简单线性有关。资料^[18-19]表明, 瓦楞纸板这样的各向异性缓冲材料在多种情况下表现出正切型载荷-变形关系, 应在后续研究中进一步优化仿真参数计算方法。

4 结语

研究了基于数值-符号仿真算法软件 MapleSim 在包装振动仿真方面的可行性。首先, 构建并验证了单层负载振动仿真模型; 在此基础上提出了可应用于随机振动的仿真模型以及关键参数转换方法; 最后, 进行了仿真和实验结果的对比。数据分析表明, 所建 MapleSim 振动仿真模型能够准确反映物理系统的随机振动, MapleSim 应用于包装件单层振动仿真具有可信性。从 PSD 分析看, 文中提出的仿真方法尚不能非常准确地描述低频时的振动情况, 故后期将进一步结合材料的非线性特征改进关键参数的计算方法。

参考文献:

- [1] 卜杨, 张新昌. 基于 Ansys Workbench 的吸尘器振动与跌落仿真[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 122—127.
BU Yang, ZHANG Xin-chang. Simulation of Vibration and Drop of Vacuum Cleaner Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 122—127.
- [2] 王慧, 刘兵. Ansys Workbench 的电容器包装箱强度校核及优化设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 13—22.
WANG Hui, LIU Bing. Strength Verification and Optimization Design of Capacitor Packaging Box Based on Ansys Workbench[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 13—22.
- [3] 董宏达, 周娅霞. 基于 Ansys/LS-DYNA 模块的空调包装实验仿真应用研究[C]// 2016 年中国家用电器技术大会论文集, 2016.
DONG Hong-da, ZHOU Ya-xia. Study on Application of Air Conditioning Packaging Experiment Simulation Based on Ansys/LS-DYNA Module[C]// 2016 China Conference on Household Electrical Appliances Technology Conference, 2016.
- [4] 孙亮, 陈希良, 齐明思. 基于 LS-DYNA 的修枝机跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 33—37.
SUN Liang, CHEN Xi-liang, QI Ming-si. Drop Simulation of Pruning Machine Based on LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 33—37.
- [5] 刘永辉, 张银. 基于有限元分析的洗衣机跌落冲击仿真及改进设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 164—166.
LIU Yong-hui, ZHANG Yin. Dropping Simulation and Design Improvement of a Washing Machine Based on FE Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.
- [6] 石峰, 曾文. Abaqus 在饮料包装稳定性评估中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 448—451.
SHI Feng, ZENG Wen. Application of Abaqus in Evaluation on Beverage Packaging Line Stability[J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(2): 448—451.
- [7] 陆正刚, 徐俊林. MapleSim 系统建模与仿真[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
LU Zheng-gang, XU Jun-lin. Modeling and Simulation of MapleSim System[M]. Beijing: China Railway Press, 2012.
- [8] 吴政, 黄亚宇, 马益书. 基于 MapleSim 挖掘机机构建模与仿真分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(24): 304—306.
WU Zheng, HUANG Ya-yu, MA Yi-shu. Mechanism Modeling and Simulation Analysis of Excavator Based on MapleSim[J]. Anhui Agricultural Science, 2015, 43(24): 304—306.
- [9] 孙文军, 阎慧, 高永明. 基于 MapleSim 和 LabVIEW 的航天器姿态控制仿真研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(11): 4202—4205.
SUN Wen-jun, YAN Hui, GAO Yong-ming. Simulation of Spacecraft Attitude Control Based on MapleSim and LabVIEW[J]. Computer Application Research, 2011, 28(11): 4202—4205.
- [10] 刘泽兴. 基于 MapleSim 的离心机仿真试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LIU Ze-xing. Simulation Test of Centrifuge Based on MapleSim[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 洛根 D L. 有限元方法基础教程(第5版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
LOGAN D L. A First Course in the Finite Element Method (Fifth Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [12] 西希安工程模拟软件(上海)有限公司. MapleSim4.0 用户手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
CCA-ES (Shanghai) Co, Ltd. MapleSim (Ver. 4.0) User's Guide[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [13] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Logistics Transport Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.

- sign[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.
- [14] GB/T 4857.23, 包装 运输包装件基本试验第 23 部分: 随机振动试验方法[S].
GB/T 4857.23, Packaging, Basic Tests for Transport Packages-Part 23: Random Vibration Test Method[S].
- [15] 苏轼试验仪器有限公司. 电气试验振动系统使用手册 (DC 600-62)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
STI Co, Ltd. User Manual of Electrical Test Vibration System (DC 600-62)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [16] HARRIS M C, PIERSOL A G. Harris' Shock and Vibration Handbook (Fifth Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [17] GB/T 4857.10, 包装 运输包装件基本试验第 10 部分: 正弦变频振动试验方法[S].
GB/T 4857.10, Packaging, Basic Tests for Transport Packages-Part 10: Sinusoidal Vibration Test Method Using at Variable Vibration Frequency[S].
- [18] SEK M A, ROUILLARD V, PARKER A. A Study of Nonlinear Effects in a Cushion-Product System on Its Vibration Transmissibility Estimates with the Reverse Multiple Input-single Output Technique[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 26(3): 125—135.
- [19] GREGORY S B, JAMES M G, MOHAMMED D. Primary Resonance Behavior of a Nonlinear, Viscoelastic Model of Expanded Polymer Cushion Material[J]. Packaging Technology and Science, 2015, 28(7): 694—709.