液晶电视包装件有限元分析及优化设计

阎帅，李光
（天津科技大学，天津 300222）

摘要：目的 将有限元分析技术应用于液晶电视包装件的抗压、抗振性能分析和优化设计中。**方法** 应用 Ansys Workbench 分析软件，建立液晶电视、缓冲衬垫和瓦楞纸箱的有限元模型。模拟包装件在物流运输和仓库堆码时，包装件受压时的变形受力情况，以及运输过程中的振动情况。以包装件的质量、固有频率及最大变形量为目标函数对液晶电视缓冲衬垫进行多目标优化设计。**结果** 经过静压分析，液晶电视缓冲衬垫最大变形量为 0.362 mm，包装件所受最大应力为 70 339 Pa；经过模态分析，包装件的一阶固有频率为 7.7471 Hz。经过优化分析，缓冲衬垫高度和顶部凹槽深度的最佳设计点分别为 200.83, 19.34 mm，与原始设计值相比，包装件各项性能得到了显著提升。**结论** 通过对液晶电视仿真分析和优化设计，可以对缓冲衬垫结构尺寸进行改进，降低了产品破损率同时节约材料。

关键词：液晶电视包装件；有限元分析；优化设计
中图分类号：TB484.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2017)01-0121-07

Finite Element Analysis and Optimization Design of LCD TV Package

YAN Shuai, LI Guang
(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

ABSTRACT: The work aims to apply the finite element analysis technology to anti-compressive and anti-vibration properties analysis and optimization design of LCD TV package. With the application of ANSYS Workbench analysis software, the finite element model of LCD TV, cushion and corrugated boxes was built. The situation where packages were subject to deformation and stress as well as the vibration during the transportation was simulated in the process of logistics transportation and warehouse stacking. Multi-objective optimization design of the LCD TV cushioning pad was done with packaging mass, natural frequency and maximum deformation as objective functions. After the static pressure analysis, the maximum deformation of the LCD TV cushion was 0.362 mm, and the maximum stress of the package was 70 339 Pa. After the modal analysis, the first-order natural frequency of the package was 7.7471 Hz. After optimization analysis, the optimal design points of cushion height and top groove depth were 200.83 mm and 19.34 mm respectively. Compared with the original design value, all the performances of the package were improved significantly. Through the simulation analysis and optimization design of LCD TV, the size of the cushion structure can be improved, which saves materials while reducing the damage rate of the product.

KEY WORDS: LCD TV package; finite element analysis; optimization design

产品从生产线上装配完成到交付到消费者使用之前，仓储、物流运输等环节中的堆码压力、粗暴装卸、运输振动与冲击都会对产品造成一定的损害，影响其美观甚至正常使用[1]。如果缓冲结构设计不当，缓冲材料选用不合理，产品就会产生破损。目前大多选用抗压、跌落和振动试验等来对包装件的性能做出评价并加以改进[2]。这种传统物理实验已经不能很好的显示受压过程和振动变形机理。另外，实物试验的成本太高，且会延长产品生产周期。

受益于计算机技术的普及和大范围应用，在包装

收稿日期：2016-06-23
作者简介：阎帅（1993—），女，天津人，天津科技大学硕士生，主攻包装机械设计及仿真优化。
通讯作者：李光（1975—），男，山东潍坊人，天津科技大学副教授，主要研究方向为包装机械与虚拟仿真、包装动力学。

测试领域，计算机辅助模拟分析技术的使用范围越来越广[3]。目前使用 CAE 技术针对电子产品的包装性能研究在一些文献中也曾提到，主要以 Ansys, Abaqus 为平台进行有限元模型仿真分析，包括抗压、振动和跌落仿真分析等，并对分析结果进行优化求解，来评价其产品缓冲包装质量。张沙[4]应用 Ansys Workbench 的瞬态动力学模块，研究了电磁炉包装件在运输过程中的振动特性。华丽[5]利用 Ansys/LS-DYNA 软件对洗衣机运输包装件进行跌落仿真试验。马国鹭等[6]利用 Ansys/LS-DYNA 进行了电视裸机与带包装 2 种工况下的跌落仿真模拟。Mills[7]利用 Abaqus 得到了泡沫缓冲材料和瓦楞纸箱的受力变形曲线。Hsu[8]应用 LS-DYNA 软件模拟了以 EPE 为缓冲材料的 LCD 显示器包装件的振动和跌落情况。丁玉平[9]利用 Ansys Workbench 对电饭煲包装件缓冲衬垫的动态缓冲特性进行了分析。CAE 技术使产品包装性能分析简单化、层次化，节省了大量的时间，在新产品开发等方面发挥了重要的作用。文中以液晶电视包装件为研究对象，利用 Ansys Workbench 建立产品三维模型，并进行有限元分析，模拟在物流运输过程中包装件的受压和振动情况，并对缓冲衬垫结构尺寸进行多目标优化设计。

1 有限元建模

1.1 液晶电视包装件建模

试验对象是长虹牌液晶电视机，型号为 39D3700i，规格为 812 mm×560 mm×80 mm。外包装箱为 0201 型瓦楞纸箱，尺寸规格为 986 mm×155 mm×650 mm，楞型为 AB 楞。衬垫的材料是 EPS，采用上下两侧全托的形式。除了上衬垫和下衬垫之外，还有中部衬垫，中部衬垫主要起到保护电视液晶屏幕的作用。

为了方便网格划分、求解设置、计算收敛等，在充分分析液晶显示器各部分在整体结构中所起作用的基础上，忽略了按钮、数据接口等部分，并对模型进行了简化。考虑到液晶屏是电视机在运输流通过程中最易受损的部位，将液晶电视包装件分为液晶屏、外壳、缓冲衬垫（上、中、下）、外包装箱共 6 部分，对不同的部分定义不同的材料。运用 Ansys Workbench 中自带的图形建模模块，建立液晶电视运输包装件的实体模型，见图 1。

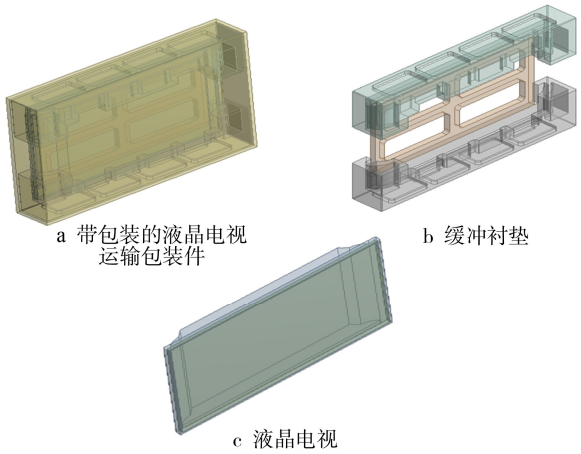


图 1 液晶电视运输包装件实体模型

Fig.1 The physical model of liquid crystal TV transport package

1.2 材料参数设置

对于液晶电视运输包装件各个部分的不同材料，需要设置不同的材料参数。包装件所用到的材料有 EPS、ABS+PC 树脂、瓦楞纸板，这些材料的参数均不包含在 Workbench 自带的材料库中，需参照相关资料设置[10]。模型中各部分的主要材料参数如下：缓冲衬垫 EPS 密度为 20 kg/m^3，弹性模量为 5.112 MPa，泊松比为 0.28；电视外壳 ABS+PC 密度为 1700 kg/m^3，弹性模量为 2350 MPa，泊松比为 0.394；液晶屏玻璃基板密度为 800 kg/m^3，弹性模量为 60 GPa，泊松比为 0.25。

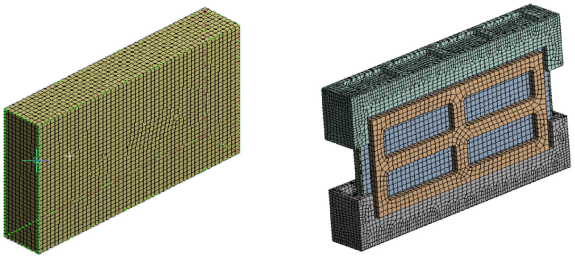
由于瓦楞纸板在 x, y, z 等 3 个方向的承压能力不同[11]，根据方艳平[12]和贾丽平[13]关于瓦楞纸箱有限元分析的研究结果，结合文中研究对象的实际情况，设置瓦楞纸板的材料参数：密度为 149.08 kg/m^3, x 方向弹性模量为 156.75 MPa, y 方向弹性模量为 738.1 MPa, z 方向弹性模量为 250 MPa, xy 泊松比为 0.34, yz 泊松比为 0.15, xz 泊松比为 0.15。

1.3 包装件各部分接触设置

Workbench 中共有 5 种接触类型可供选择，并且带有接触侦测的功能，即可以自动侦测并且建立各部件间的相互接触。根据此研究中液晶电视机包装件各个部分之间的装配方式，设置接触关系。电视机外壳与液晶屏之间、电视机与衬垫之间均定义为绑定（Bonded）接触，包装箱与缓冲衬垫之间定义为摩擦（Frictional）接触，摩擦因数为 0.12。

1.4 实体模型的网格划分

网格划分的质量不仅关系到计算的准确度，还会严重影响计算时间。在保证时间步长的前提下，要使网格划分尽可能细[14]。文中的网格为六面体单元，因为六面体单元不仅能够减少计算的时间，还可以提高计算的精度。液晶电视的上下 2 个衬垫为不规则实体，为了使分析结果较准确，设置网格尺寸为 0.02 m，避免过小网格的产生。划分后，有限元模型中总共有 166 957 个节点和 52 911 个单元，见图 2。



a 带包装箱　　b 去掉包装箱

图 2　网格划分后的实体模型
Fig.2 Solid model after mesh division

2　静压仿真分析

液晶电视包装件运输流通过程中的主要压力由堆码产生。合理堆码不仅可提高仓储面积的利用率，还可使位于底层的包装件不至于在上层纸箱的重力作用下压坏、变形。

2.1　载荷的计算

载荷计算公式：

$$F=9.81KM(N_{max}-1) \quad (1)$$

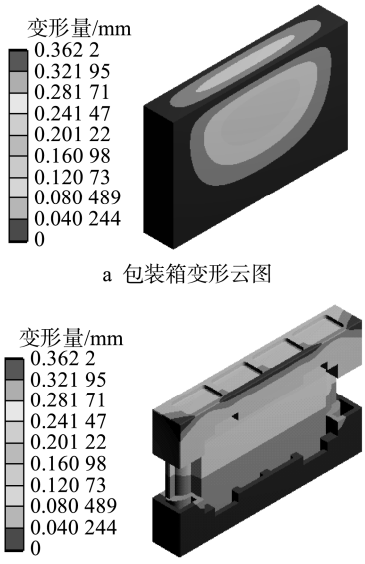
式中：F 为纸箱载荷（N）；K 为载荷系数；M 为单个纸箱包装总质量（kg）；N_{max} 为最大堆码层数。已知包装件总质量为 8.7 kg，已知产品最大堆码层数为 3，K 值根据载荷系数表[9]取 2。由式(1)可得 F 值为 341.388 N。用 F 除以纸箱承载面面积，得到纸箱上表面压强为 2067.21 Pa。

2.2　抗压模拟仿真分析

文中利用 Workbench 中的 Static Structure 模块对抗压模拟进行仿真分析。在进行压力试验时，在纸箱底面上设置约束，使包装件底面固定不动，然后在顶面施压。研究中底层包装件所受的静力作用主要是在仓库堆码过程中产生的，属于静力载荷。

2.2.1　变形情况

包装箱和缓冲衬垫在压力下的变形情况见图 3。由图 3a 可知，瓦楞纸箱变形量并不明显。变形量最大的部位位于上方的缓冲衬垫上为 0.362 mm。结合电视机包装件的结构可知，液晶电视在缓冲衬垫中的位置较靠前，电视机外壳背部的缓冲材料明显较多，从而使得包装件在受压时变形不均，有向一侧扭曲、倾斜的趋势。整体来看，受压面附近的变形量明显大于其他的部分。由图 3b 可知，整个液晶电视机在受压时变形较小为 0.159 mm，最大变形出现在电视机的上方受力面上。



a 包装箱变形云图

b 缓冲衬垫变形云图

图 3　压力下包装件变形云图
Fig.3 Deformation of the package under pressure

2.2.2　等效应力

整个包装件的应力云图见图 4。包装件受压时最大应力出现在瓦楞纸箱顶部面中间位置，为 70 339 Pa。瓦楞纸箱顶部中间位置是整个包装件的应力集中区域，液晶电视承受的应力较小，绝大部分都在 2682.5 Pa 以下。由此可知在受压时，应力集中在瓦楞纸箱上，衬垫对液晶电视的保护性能较好，稍大的应力集中不会对液晶电视造成伤害。

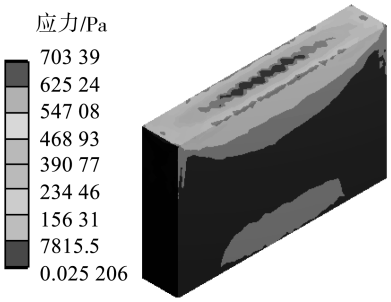


图 4　包装件的等效应力云图
Fig.4 Equivalent stress contour of package

3　模态分析

3.1　理论基础

模态分析主要用来确定产品的固有频率以及振型，从而在运输和使用过程中避开产品的固有频率，以免发生共振。研究的包装件模态分析基于静压仿真分析的基础上进行，方法是在 Workbench 中的 Toolbox 窗格中选中 Modal，用鼠标拖至右侧即可。应用 Ansys Workbench 中的 Modal 模块，可以对运输包装产品的振动性能进行模拟，从而提前发现产品抗振性能较差的部位，改进产品的结构。动力学通用方程为：

$$[M]\{\ddot{q}\}+[C]\{\dot{q}\}+[K]\{q\}=\{F(t)\} \quad (1)$$

式中：[M], [C], [K]为系统的质量、阻尼及刚度

矩阵；{q}为位移向量；{$F(t)$}为激励向量。

对于模态分析，包装件的固有模态由其本身的特性和材料特性决定，与外载荷无关；而阻尼对固有频率的影响很小，可以忽略。则可将式(1)简化为无阻尼自由振动方程：

$$[M]\{\ddot{q}\}+[K]\{q\}=0 \tag{2}$$

当发生谐振动时，有：

$$\{q\}=\{\varphi_i\}\cos(\omega_i t) \tag{3}$$

式中：φ_i为振型（特征向量）；ω_i为振型的固有圆周频率。

将式(3)代入式(2)，化简为：

$$(-\omega_i^2[M]+[K])\{\varphi_i\}\cos(\omega_i t)=0 \tag{4}$$

若 φ_i=0 是无意义的，则

$$([K]-\omega_i^2[M])\{\varphi_i\}=0 \tag{5}$$

特征方程为：

$$|[K]-\omega_i^2[M]|=0 \tag{6}$$

对于包装件的模态分析，其固有频率 ω_i 和振型 φ_i 均能从矩阵方程式(6)中得到。

3.2 模态分析结果

研究设置的模态数目是六阶，时间步长为 2.5 s。对液晶电视包装件进行模态分析后，提取前四阶模态，其固有频率分别为 7.74, 28.54, 40.77, 52.15 Hz，液晶电视包装件去掉包装箱后的前四阶振型见图 5。

由图 5c 可知，液晶电视运输包装件的最大变形量为 0.412 62 m，发生在第 3 阶振动时的上层衬垫两端位置上。这是由于液晶电视包装件在上面受压时，这个部分起到力的传递作用。在实际情况中，缓冲衬垫会受到瓦楞纸箱的固定与支撑，产生的位移很小。由于在包装件底面设置了固定约束，所以下层衬垫位移量较小。

由图 5c 可知，液晶电视运输包装件的最大变形量为 0.412 62 m，发生在第 3 阶振动时的上层衬垫两端位置上。这是由于液晶电视包装件在上面受压时，这个部分起到力的传递作用。在实际情况中，缓冲衬垫会受到瓦楞纸箱的固定与支撑，产生的位移很小。由于在包装件底面设置了固定约束，所以下层衬垫位移量较小。

交通部对于汽车运输冲击振动的测试结果表明：在汽车运输过程中在 2, 7 Hz 左右汽车运输的随机振动功率谱密度会出现峰值，采用公路运输的包装件固有频率要避开这 2 个频率值[15]。液晶电视包装件的第 1 阶固有频率为 7.7471 Hz，处于 2 ~ 10 Hz 之间，比较危险。这也是在后续的研究中有待于优化的参数。

交通部对于汽车运输冲击振动的测试结果表明：在汽车运输过程中在 2, 7 Hz 左右汽车运输的随机振动功率谱密度会出现峰值，采用公路运输的包

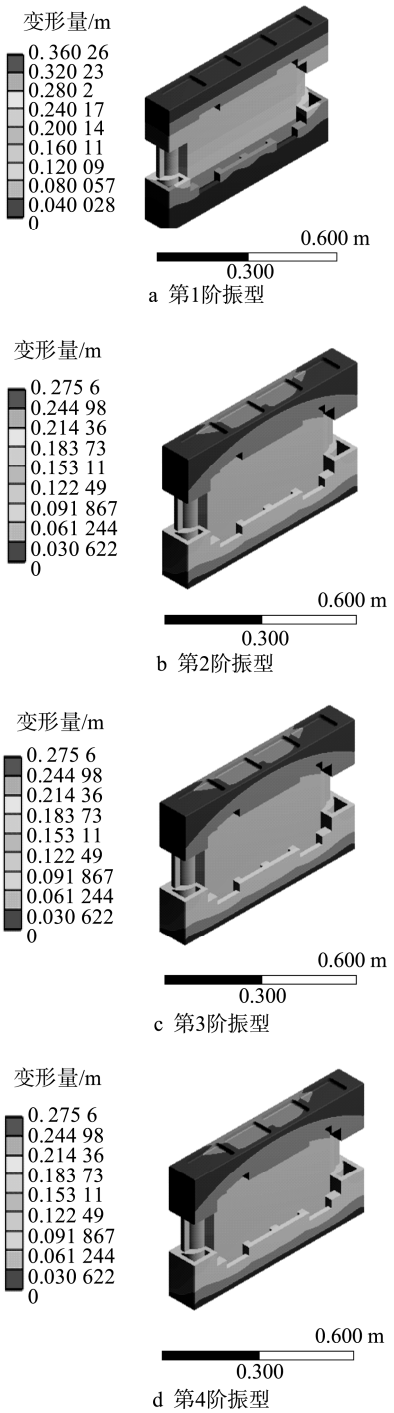


图 5 包装件振型

Fig.5 Package vibration diagram

装件固有频率要避开这 2 个频率值[15]。液晶电视包装件的第 1 阶固有频率为 7.7471 Hz，处于 2 ~ 10 Hz 之间，比较危险。这也是在后续的研究中有待于优化的参数。

4 多目标优化设计

4.1 优化模型的建立

优化设计的目的在于保证缓冲泡沫对液晶电视

的保护作用的同时，减少缓冲衬垫的用量，使整个运输包装件轻量化；同时减小最大变形量，降低道路运输过程中发生共振的可能性。在进行优化设计之前，首先要在 DM 建模(Geometry)模块中设定设计变量，其次在 Static Structure 和 Model 模块中选定目标函数，然后在生成的参数工作空间（ Parameter Set ）中输入优化设计的参数值。

考虑到包装件的堆码方式为竖直堆码，若改变上下衬垫的长和宽，会导致堆码不稳，故选择缓冲衬垫的高度和衬垫顶部凹槽深度为设计变量，见图 6。选取包装件衬垫的质量（ Mass)、模态分析中的最大变形量和第一阶固有频率（ Frequency ）作为目标函数。结合包装件原始尺寸、静压和模态分析结果，设计变量和目标函数的初始值见表 1(P11 至 P15 均为参数代码)。

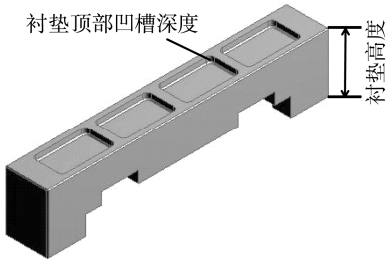


图 6　选定的设计变量
Fig.6 Selected design variables

表 1　参数取值范围
Tab.1 The ranges of the control parameters

	名称	初始值	最大值	最小值
设计变量	衬垫高度/mm（P_{13}）	200	220	180
	衬垫顶部凹槽深度/mm（P_{11}）	20	22	18
	衬垫质量/kg（P_{12}）	0.254 36	0.25	—
目标函数	最大变形量/m（P_{15}）	0.412 62	0.3	—
	一阶振动固有频率/Hz（P_{14}）	7.7471	—	15

4.2　优化计算结果及分析

4.2.1　优化结果

应用 Ansys Workbench 的直接优化（ Direct Optimization ）和响应曲面（ Response Surface ）模块，利用回归方程等数学方法，从一定量的样本中找出优化搭配[16]，得出最佳设计点，达到优化目的。直接优化后，共得到 50 组相关数据，选取较接近目标优化值且具有代表性的 7 组数据列出，见表 2。

4.2.2　灵敏度分析

对设计变量与目标函数之间的关系做灵敏度分析，分析结果见图 7。可以看出衬垫高度（P_{13}）对衬垫质量（P_{12}）的灵敏度最高，影响最大，呈正相关；对最大变形量（P_{15}）和一阶振动固有频率（P_{14}），灵敏度稍低，呈负相关。衬垫顶部凹槽深度（P_{11}）只对衬垫质量（P_{12}）灵敏度较高，呈负相关，对其他 2 个目标函数的灵敏度都比较低。综合以上因素分析，优化结果主要是通过改变衬垫高度和对衬垫顶部凹槽深度的微调来达到优化的目的。

表 2　优化结果
Tab.2 Optimization results

组别	衬垫顶部凹槽深度/mm	衬垫高度/mm	衬垫质量/kg	最大变形量/m	一阶振动固有频率/Hz
DP1	18	180	0.181 77	0.418 11	8.0127
DP2	18.38	202.7	0.244 37	0.381 88	29.369
DP3	18.7	201.45	0.2404	0.384 72	34.383
DP4	19.02	203.95	0.246 86	0.412 63	9.1734
DP5	19.34	200.83	0.237 67	0.384 22	34.345
DP6	19.42	210.83	0.265 39	0.445 03	34.733
DP7	22	180	0.175 61	0.416 27	7.8083

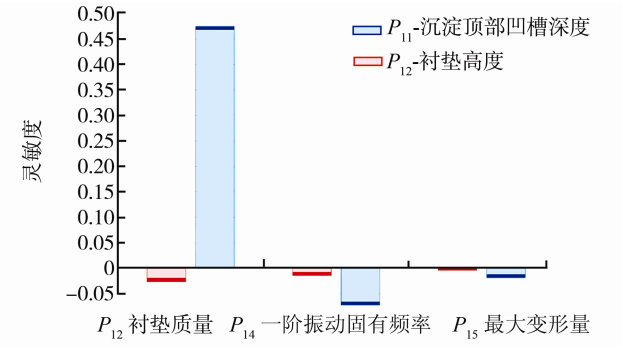


图 7　各尺寸灵敏度分析结果
Fig.7 Sensitivity analysis of each dimension

4.2.3　响应曲面分析

最大变形量、一阶振动固有频率、衬垫质量关于衬垫顶部凹槽深度（P_{11}）和衬垫高度（P_{13}）的三维响应曲面分布图见图 8。可以看出衬垫高度、凹槽深度和衬垫质量呈线性关系，与最大变形量、一阶振动固有频率都是非线性关系。随着衬垫高度的减小，一阶振动固有频率先增大后减小。衬垫高度和凹槽深度的相互作用影响最大变形量。

4.2.4　结果比较

根据表 3 中的目标函数取值范围和对优化结果的综合考虑，选取 DP5 作为优化设计点，并将优化结果与原始尺寸进行对比，见表 3。

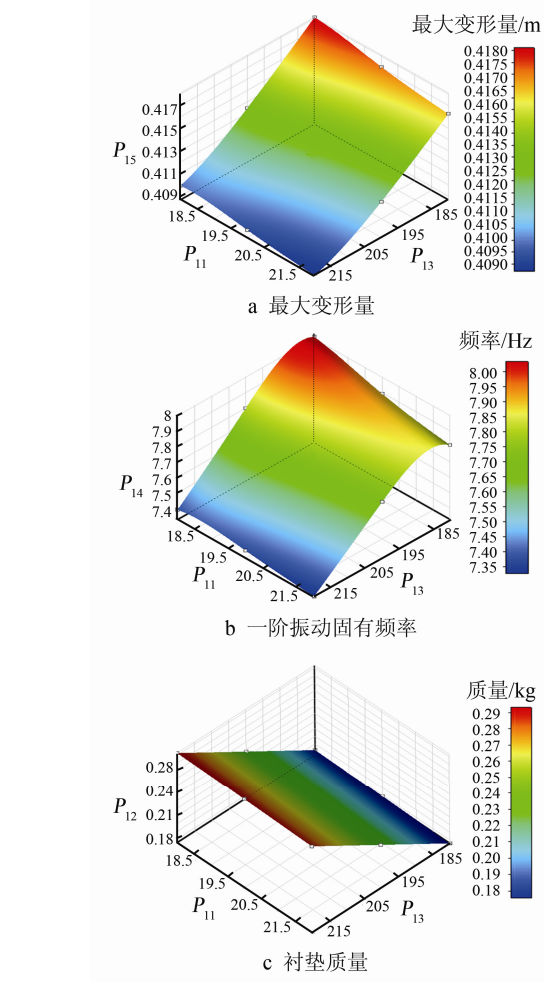


图 8　最大变形量、一阶振动固有频率、衬垫质量与 P_{13}, P_{11} 三维响应曲面分布

Fig.8 Three-dimensional response surface map

表 3　优化结果对比

Tab.3 Comparison of optimization results

名称	原始值	优化后
衬垫高度/mm	200	200.83
衬垫顶部凹槽深/mm	20	19.34
衬垫质量/kg	0.25436	0.23767
最大变形量/m	0.41262	0.38422
一阶振动固有频/Hz	7.7471	34.345

优化后的设计值，与原始尺寸相比，各项性能有明显提升，尤其是增大了一阶振动固有频率，避免了低阶固有频率与外界激振力频率接近或相等而发生共振。衬垫质量和最大变形量也有显著降低，达到了包装轻量化的目的，降低了运输过程对包装件造成的损害和减少了物流成本。

5　结语

通过 Ansys Workbench 有限元分析软件对液晶电视包装件进行静力学分析和模态分析，计算了整体变形及受力情况，并对缓冲衬垫结构进行了多目标优化设计。

通过该分析提出对现有产品的优化方案，有助于在新产品开发时采取不同的防范措施，最大程度地降低产品破损率，避免不必要的损失。值得指出的是，文中在研究中对电视机的零部件及外观做了简化处理。另外为了简化纸箱模型，将瓦楞纸板用与其性能相同的等效板来替代，因此有限元分析结果具有一定的局限性。

参考文献：

[1] 崔小龙, 王泉中, 蒋身学. 基于 ANSYS 的机电产品包装箱底架模态分析与研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(6): 35—39.
CUI Xiao-long, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. The Modal Analysis of Mechanical Products Packing Box Chasis in ANSYS[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(6): 35—39.

[2] 张菊飞. 基于 ANSYS Workbench 的商用汽车暖风机的物流运输包装设计与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
ZHANG Ju-fei. On Logistics and Distribution Packaging of Unit Heater for Commercial Automobile via ANSYS Workbench[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.

[3] 李兴洲. 电子产品包装性能 CAE 研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LI Xing-zhou. The CAE Research on Packaging Properties of Electronic Products[D]. Jinan: Shandong University, 2011.

[4] 张沙, 钱怡. 电磁炉包装件的振动特性仿真分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 56—60.
ZHANG Sha, QIAN Yi. Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Induction Cooker Package[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 56—60.

[5] 华丽. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的洗衣机运输包装件的跌落仿真分析[J]. 机电一体化, 2008, 14(2): 71—73.
HUA Li. Dropping Simulation Analysis of the Transport Package for Washing Machine Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Mechanical and Electrical Integration, 2008, 14(2): 71—73.

[6] 马国鹭, 刘丽贤, 曾国英. 长虹某型电视机包装的跌落冲击响应分析[J]. 包装工程, 2008, 29(9): 6—7.
MA Guo-lu, LIU Li-xian, ZENG Guo-ying. Dropping Impact Analysis of the Packaging Structure of Changhong Television[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 6—7.

[7] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis (FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science, 2005, 18(1): 29—38.

[8] HSU H S, HSIAO B. Application of LS-DYNA in

Electronic Products[C]// Detroit, 7th International LS-DYNA Users Conference, 2002 .

[9] 丁玉平, 钱怡. 基于 Ansys Workbench 的整体包装件动态缓冲特性仿真分析[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 18—22.
DING Yu-ping, QIAN Yi. Dynamic Cushioning Property Simulation Analysis of the Overall Package Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 18—22.

[10] 车宪香. 包装件跌落模拟计算与缓冲结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2013.
CHE Xian-xiang. Computer Simulation on Drop Tests of Packages and Optimization of Cushion Foams Structure[D]. Jinan: Shandong University, 2013.

[11] 温时宝, 薛蕾. 层合瓦楞纸板三向静态平压性能研究[J]. 包装学报, 2011, 3(2): 40—43.
WEN Shi-bao, XUE Lei. Research of 3 Direction Static Flat Compression Properties for Laminated Corrugated Paperboard[J]. Packaging Journal, 2011, 3(2): 40—43.

[12] 方艳平. 瓦楞纸箱抗压试验研究与有限元分析[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
FANG Yan-ping. Experimental Investigation and Finite Element Analysis of the Compression Strength of Corrugated Box[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.

[13] 贾丽平. 瓦楞纸箱抗压强度的试验研究与有限元分析[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
JIA Li-ping. A Test Study and Finite Element Analysis about Corrugated Box Compression Strength[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.

[14] ANJANEYULU Y, MANIKANTA K, PRASAD K. Modelling and Optimization of I. C Engine Crank Shaft with Different Materials and Loads by using Finite Element Analysis[J]. International Journal of Innovative Technologies, 2015, 12: 1994—1998.

[15] 苏远, 吕勇, 赵德坚. 公路运输环境因素的测试[J]. 包装工程, 2007, 28(9): 1—4.
SU Yuan, LYU Yong, ZHAO De-jian. Measurement of Transportation Environmental on Truck[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9): 1—4.

[16] 程彬彬, 黄美发, 吴常林, 等. 基于 ANSYS Workbench 的龙门铣床横梁多目标优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 10—12.
CHENG Bin-bin, HUANG Mei-fa, WU Chang-lin, et al. Multi-objective Optimization Design of Gantry Milling Machine Beam Based on ANSYS Workbench[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(2): 10—12.