

冰箱的缓冲包装 CAE 分析

程敏, 陈满儒

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 研究冰箱在运输过程中的振动和冲击特性。**方法** 利用 Pro/E 建立冰箱缓冲包装模型, 并对模型进行适当简化, 然后利用有限元分析软件 Ansys 对冰箱缓冲包装的振动和冲击特性进行模拟分析计算。**结果** 求出了冰箱缓冲包装的固有频率与固有振型, 以及在公路运输过程中受到振动和冲击下的动态响应。**结论** 所提出的模拟产品包装系统的振动和冲击特性的方法, 不仅缩短了产品的设计周期, 而且为电子产品的包装设计提供了依据。

关键词: 有限元分析; 运输包装; 冲击; 振动

中图分类号: TB485.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0094-04

CAE Analysis on Cushioning Packaging for Refrigerator

CHENG Min, CHEN Man-ru

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the vibration and shock characteristics of the refrigerator during the distribution. The model for cushioning packaging of the refrigerator was established by Pro/E and the model was properly simplified. Then, the vibration and shock characteristics of the refrigerator's cushioning packaging were simulated, analyzed and calculated with the finite element analysis software Ansys. The natural frequencies and vibration modes of the refrigerator's cushioning packaging were obtained, and the dynamic responses to the vibration and shock during highway transportation were obtained. The proposed method that simulates the vibration and shock characteristics of product packaging system not only shortens the design period, but also provides the basis for the packaging design of the electronic products.

KEY WORDS: finite element analysis; distribution packaging; shock; vibration

电子产品在流通时适应动态环境的强度设计, 对产品的安全运输具有重要意义^[1-3]。流通时的动态环境有卡车运输时的振动、冲击等^[4], 在这样的环境下进行保护产品的缓冲设计, 有必要了解产品结构部分的振动特性及冲击强度。这里的分析主要围绕公路运输进行, 因而主要考虑的是公路运输中遇到的各种振动和冲击情况, 目前所使用的研究方法是在实际条件下对包装件进行测试, 通过对产品进行振动和冲击试验, 测得内装产品在振动和冲击外力作用下的动态力、加速度、位移等。这种试验对产品具有破坏性, 且试验费用昂贵, 解决这个问题的途径之一是用有限

元法进行计算模拟, 使产品从开发设计阶段就力求强度合理化。现对电冰箱进行模拟分析, 冰箱在流通过程中, 最易损坏的是压缩机。在静态堆码下, 不会对压缩机造成损坏, 但在产品受到振动和冲击时, 由于压缩机冷却管里制冷剂产生摇晃, 对压缩机的寿命会造成影响, 需要对压缩机振动和冲击外力作用下的动态力、加速度、位移进行分析。同时, 在产品受到振动和冲击时, 冰箱箱壁也极易损坏, 因此将冰箱缓冲包装简化为以压缩机作为易损件的模型^[5-6]。用 Ansys 有限元软件对模型进行模拟分析计算, 进行动态环境适应性探讨。

收稿日期: 2017-04-25

作者简介: 程敏 (1994—), 女, 陕西科技大学硕士生, 主攻运输包装。

通讯作者: 陈满儒 (1957—), 男, 陕西科技大学教授, 主要研究方向为缓冲包装动力学。

1 模型的建立

包装件一般由内装物（或产品）、非线性粘弹性缓冲垫、瓦楞纸箱等外包装组成。当内装物存在易损元件，且需考虑易损元件的缓冲包装动力学行为时，最常见的缓冲包装动力学模型见图 1。这里选用冰箱进行模拟分析，箱体结构见图 2^[7]。由于主要研究冰箱在运输过程中结构部分的振动特性和冲击强度，所以将冰箱在运输过程中最容易损坏的部件——压缩机作为易损件，建立一个以压缩机为易损件的冰箱简化模型^[8]。简化模型见图 3a—b，压缩机模型见图 3c。该模型是含有易损伤部位（构成部件）的内装物和缓冲材料的缓冲包装模型。

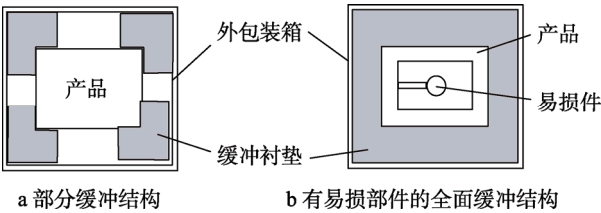


图 1 常见的缓冲包装动力学模型
Fig.1 Typical dynamic model of cushioning packaging

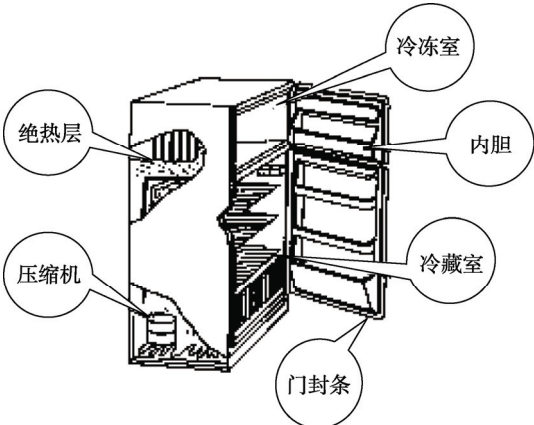


图 2 箱体结构
Fig.2 Box structure

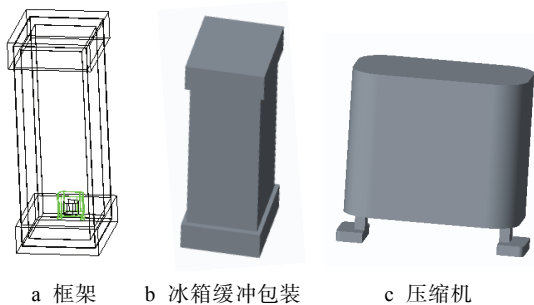


图 3 冰箱简化模型
Fig.3 Simplified model of refrigerator

冰箱的缓冲包装包含上下两个缓冲垫，因此模型的形状为在产品的上下两个部位包上缓冲材料的结构。简化模型由冰箱壁（由外层、中层和里层构成）、

压缩机（压缩机分为两部分，即压缩机壳和压缩机壳里面的实体）、上下缓冲衬垫组成，其中缓冲衬垫采用的是 EPE 塑料。

2 模拟结果分析

这里主要研究的流通过程是公路运输，因而主要考虑公路运输中遇到的各种振动和冲击情况。利用 Ansys Workbench 对模型进行前处理，然后对模型做模态分析、谐响应分析以及瞬态动力学分析的模拟仿真分析计算^[9]。

2.1 模态分析

模态分析主要是用来确定产品的固有频率以及振型，使产品在运输、使用过程中避开产品的固有频率，以防止发生共振。

2.1.1 建模和网格划分

在 Pro/E 中先建好模型，再导入 Ansys Workbench 中，创建模型时首先确定初始单位，选定坐标系，确保 Ansys Workbench 中显示的模型尺寸和实际模型尺寸一致。整个模型均采用实体单元，其材料的属性参数见表 1，网格将根据模型材料的特性分别进行网格划分，网格的大小根据模型各个部位的特性分别设置，模型网格划分见图 4。

表 1 材料的属性参数
Tab.1 Property parameters of materials

材料名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	材料种类
箱壁外层	7800	2.06×10^5	0.3	低碳钢板
箱壁中层	30	40	0.33	硬质聚氨酯 泡沫塑料 ^[10]
箱壁里层	1050	2200	0.394	ABS 塑料
压缩机壳	7800	2.06×10^5	0.3	钢板
缓冲垫	12	1.45	0.1	EPE ^[11]

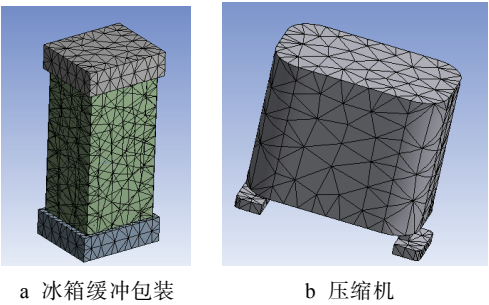


图 4 模型的网格划分
Fig.4 Meshing of model

2.1.2 定义约束和接触类型

在模型底面，即缓冲垫底面施加固定约束，由于整个模型中冰箱壁和压缩机是一个整体，因此将它们

的接触设置成绑定约束, Ansys Workbench 默认的接触类型为 Bonded, 因此可省去这一步^[12]。由于冰箱和缓冲垫之间存在摩擦, 因此将冰箱外层和缓冲垫的接触类型设置为 Frictional。

2.1.3 模态分析

对冰箱缓冲包装进行模态分析时, 提取模态分析的前 6 阶固有频率与振型。模态分析前 6 阶固有频率分别为 22.835, 25.962, 69.006, 104.83, 113.89, 116.88 Hz。

模态分析第 4 阶固有频率振型见图 5。由交通部对汽车运输冲击振动的测试结果表明, 在汽车运输过程中, 2, 10 Hz 左右时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的固有频率要避开这 2 个频率值。该模型的第 1 阶固有频率为 22.835 Hz, 避开了 2, 10 Hz。

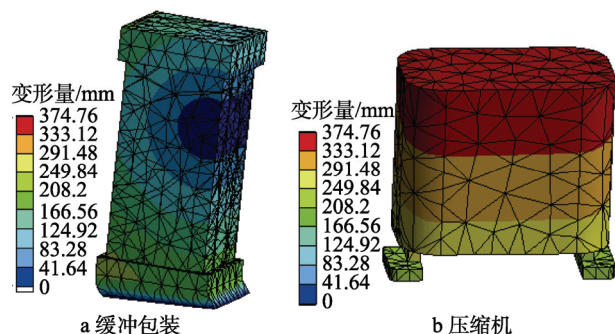


图 5 第 4 阶固有频率振型

Fig.5 Fourth-order natural frequencies and vibration mode

2.2 谐响应分析

2.2.1 施加加速度

谐响应分析在模态分析的基础上进行, 因此谐响应分析直接从模态分析的求解后进行, 由于在模态分析里已经施加了约束, 所以在谐响应分析过程中只需要给模型施加一个加速度^[13-14]。由于产品在公路运输过程中会受到车厢底板最大为 6.0513g 的加速度激励, 因此需要给予模型底部 59.3 m/s² 的加速度^[3]。设置频率为 0~150 Hz, 设为 10 阶。

2.2.2 结果分析

综合模型 3 个方向上的位移和加速度曲线可知, 模型在 105 Hz 左右时位移最大, 为 z 轴方向 20.393 mm 处, 加速度也达到最大, 为 98.763g。由于中国机械标准化规定冰箱的脆值最大为 90g, 冰箱压缩机的脆值最大为 40g, 因此 z 轴方向的最大加速度超过了冰箱的脆值, 会对冰箱造成损害, 且 105 Hz 位于模态分析的第 4 阶固有频率附近^[1]。

由结果可知, 第 7 阶频率为 105 Hz 时位移最大, 且发生在压缩机, 这里研究的主要是易损件压缩机, 因此分析结果与实际吻合。频率为 105 Hz 时的模型位移分布见图 6。

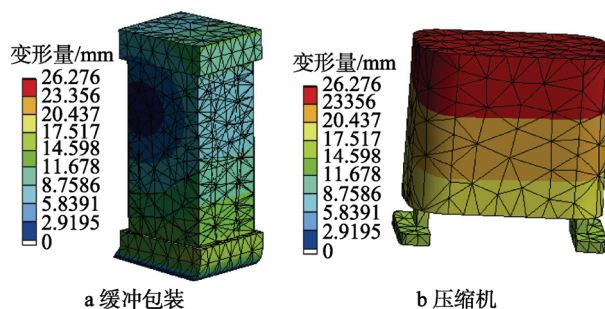


图 6 105 Hz 时模型位移分布

Fig.6 Distribution of model displacement at 105 Hz

对比模态分析第 4 阶固有频率振型图, 发现两者非常相似, 位移由一侧的中心向外逐渐变大, 而压缩机的位移由底部向上逐渐变大, 并且在这一阶压缩机的位移达到最大位移。可知冰箱在公路运输时受到车厢地板 6.0513g 的加速度激励时, 在 105 Hz 附近发生了共振, 会受到较大的损害, 因此在公路运输中要避免冰箱受到振动为 105 Hz 的激励^[15]。

2.2.3 结果验证

利用单自由度系统理论进行验证, 缓冲垫的静变形为 0.384 64 mm, 此时求得系统的固有频率^[1]:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{\delta_{st}}} = 159.7 \text{ rad/s}$$

$$f = \omega_n / 2\pi = 25.43 \text{ Hz}$$

式中: ω_n 为系统的固有频率; δ_{st} 为缓冲垫的静变形。

由模态分析和谐响应分析结果可知, 模型第 1 阶固有频率为 22.835 Hz, 利用单自由度系统理论近似计算得到的结果与分析结果大概一致, 因而分析的结果得到验证。

2.3 瞬态动力学分析

2.3.1 施加加速度

瞬态动力学分析过程中需要给模型施加载荷步以及加速度。将载荷步分 2 步施加, 产品在公路运输过程中会受到冲击, 产品会因为惯性力受到加速度激励, 在公路运输过程中受到最大加速度激励为 8 m/s², 因此需要给予模型 8 m/s² 的加速度^[1]。

2.3.2 结果分析

模型的最大应力发生在 0.1155 s, 最大应力为 724.1 kPa。模型的应力分布见图 7。由图 7 可知整个模型的最大应力出现在箱壁上, 压缩机的最大应力出现在压缩机支座上, 出现了应力集中现象, 这是由于压缩机与冰箱壁接触时, 通过支座传递力造成的。在模型中, 缓冲垫的应力较小, 冰箱壁和压缩机支座的应力较大, 箱壁上最大应力为 724.1 kPa, 而压缩机支座上的最大应力低于箱壁上最大应力, 其他部件应力较小。冰箱壁的强度极限是 235 MPa, 压缩机壳

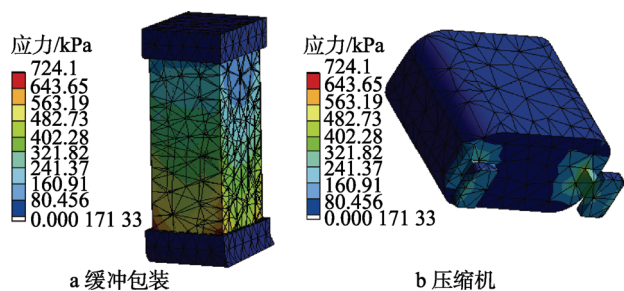


图7 模型应力云图

Fig.7 Stress contour of model

的强度极限也是 235 MPa, 经过比较, 冰箱壁的最大应力明显小于其强度极限, 压缩机支座上承受的最大应力也远远小于其强度极限, 因此说明产品并没有受到损害。

3 结语

研究了冰箱结构部分在运输过程中的振动和冲击特性, 分析采用 Pro/E 建立了冰箱缓冲包装模型, 并对模型进行了适当的简化。用有限元法对冰箱缓冲包装的振动和冲击特性进行了模拟分析计算, 对模型做了模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析。根据以上分析, 可求出各种条件下的应力、变形分布、固有频率和固有振型等, 可从中发现改善要点。利用物流运输包装设计振动与冲击理论中的单自由度系统来进行验证, 发现两者结果大致相同, 保证了分析结果的准确性。

对产品结构进行了较大的简化, 使其在今后的研究过程中更加简便。提出的这种有限元模拟分析方法, 既可避免对产品破坏性的试验测试, 又可节省大量的试验费用, 推动了包装设计的发展。模拟分析在运输条件下包装件受振动和冲击激励时易损件的响应, 将分析结果用于产品设计中, 便于改进包装设计。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2013.
PENG Guo-xun. Design of Logistics and Transport Packaging[M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2013.
- [2] 孙诚. 包装结构设计[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014.
SUN Cheng. Design of Packaging Structure[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2014.
- [3] 郭彦峰. 包装测试技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
GUO Yan-feng. Packaging Testing Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [4] 王瑞栋. 包装动力学与结构设计[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1993.
WANG Rui-dong. Packaging Dynamics and Design of Structure[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1993.
- [5] 王军, 王志伟. 半正弦脉冲激励下考虑易损件的正切型包装系统冲击特性研究[J]. 振动与冲击, 2008,

27(1): 169—173.

- WANG Jun, WANG Zhi-wei. A Study on the Shock Characteristics of the Tangent Packaging System Considering the Wearing Parts under the Half Sine Pulse Excitation[J]. Vibration and Shock, 2008, 27(1): 169—173.
- [6] 郝蒙. 具有杆式易损件的包装系统动力学特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
HAO Meng. A Study on Dynamic Characteristics of Package System with a Critical Component[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [7] 冯广平, 张伟祥, 黄龙春. 基于 CAE 的冰箱产品结构 with 外包装方案优化[J]. 包装工程, 2003, 24(5): 18—20.
FENG Guang-ping, ZHANG Wei-xiang, HUANG Long-chun. Optimization of Refrigerator Product Structure and Packaging Scheme Based on CAE[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(5): 18—20.
- [8] 叶航. CAD/CAE/CAM 技术在家用冰箱压缩机研发中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
YE Hang. The Investigation and Application of CAD/CAE/CAM in Household Compressor Research and Development[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [9] 杜安平, 甘娥忠, 于亚婷. 有限元法——原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
DU An-ping, GAN E-zhong, YU Ya-ting. Principle of Finite Element Method, Modeling and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [10] 叶小薇, 董奋强, 周晓辉. 冰箱用聚氨酯泡沫塑料的密度分布机理及配方[J]. 现代塑料加工应用, 1997, 9(2): 23—26.
YE Xiao-wei, DONG Fen-qiang, ZHOU Xiao-hui. Density Distribution Mechanism and Formulation of Polyurethane Foam for Refrigerator[J]. Modern Plastics Processing and Application, 1997, 9(2): 23—26.
- [11] 王建清. 包装材料学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014.
WANG Jian-qing. Packaging Materials[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2014.
- [12] 张朝晖. 结构分析工程应用实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
ZHANG Chao-hui. Analysis of Engineering Application of Structural Analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.
- [13] 李兴洲. 电子产品包装性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LI Xing-zhou. Research on Packaging Performance of Electronic Products[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [14] 吕福庭. 机载机箱结构分析与仿真技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
LYU Fu-ting. Research on Structural Analysis and Simulation Technology of Airborne Chassis[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [15] 刘乘, 卢杰, 陈满儒. 运输包装件振动特性的计算机仿真[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 20—22.
LIU Cheng, LU Jie, CHEN Man-ru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for the Product/Packages in Shipping[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 20—22.