

箱装电子仪器安全跌落冲击数值模拟方法研究

荆玉焕¹, 张俊坤², 高欣宝²

(1. 北京理工大学, 北京 100081; 2. 军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 为正确评估跌落冲击对箱装电子仪器可靠性的影响, 确定了合理的包装参数和 design 流程, 科学指导运输与试验, 分别采用理论分析和有限元计算方法对箱装电子仪器垂直跌落的情况进行了仿真, 得到了垂直跌落条件下电子仪器最大加速度和最大位移随跌落高度与缓冲垫弹性模量变化的规律。结合产品脆值, 确定了产品储运过程中的最大堆垛高度, 并得到了合理的包装设计流程, 从而为有效指导产品包装设计、实体试验和储运安全提供了理论依据。

关键词: 跌落冲击; 有限元分析; 脆值

中图分类号: TB487; TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2012)07-0009-04

Study of Numerical Simulation Method of Electronic Instruments Packaging Drop Impact

JING Yu-huan¹, ZHANG Jun-kun², GAO Xin-bao²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Vertical drop in packaging electronic instruments was simulated using theory and finite element analysis to correctly assess the influence drop impact on reliability of electronic instruments, determine logical packing parameters and design process, guide transportation and experiment scientifically. The changing law of maximal acceleration and maximal displacement of electronic instruments with drop height and elastic modulus of buffer under vertical drop condition was obtained. The maximal height of products in storage and transportation was determined. Logical packaging design process was obtained. The purpose was to provide reference for packaging design, full-scale experiment and safety of storage and transportation.

Key words: drop impact; finite element analysis; fragility

各类电子仪器在装卸和运输过程中都可能受到强烈的振动、碰撞和冲击, 其包装结构对跌落冲击的响应特性影响着仪器的安全性和可靠性。根据 GB/T 4857 规定产品在出厂时需要对样品带包装进行垂直冲击、水平冲击等试验, 保证产品出厂质量并掌握包装件在实际流通过程中对随机冲击的响应以及包装对产品最终损害之间的关系, 为产品和包装的设计提供依据^[1-2]。

此类试验测试复杂, 试验费用高, 另外作用时间很短, 很难获得空间、时间上的连续结果, 获取参数困难; 如果实验出现仪器和包装的破损, 也很难找到损害诱因, 不利于产品的改进。笔者利用基础理论研究

箱装电子仪器垂直跌落时的冲击响应, 并结合产品脆值 $G^{[3]}$ (指产品不发生物理的或功能的损伤所能承受的最大加速度, 一般用重力加速度的倍数表示) 进行安全分析, 同时利用有限元分析软件 AUTODYN 进行仿真计算, 与理论计算值进行对比分析, 共同研究箱装电子仪器跌落冲击的响应特性, 找出一种计算科学、设计便捷的电子仪器包装设计方法。

1 垂直跌落临界参数的理论计算

电子仪器跌落冲击安全性一般是指电子仪器在严酷的冲击环境下, 冲击力传递到关键部件, 如液晶

收稿日期: 2012-02-08

作者简介: 荆玉焕(1965—), 女, 河北人, 硕士, 北京理工大学讲师, 主要从事计算机技术应用研究。

显示屏、测试传感器等,导致关键部件的位移和加速度变化,一旦位移超过缓冲垫的缓冲极限或加速度超过关键部件的脆值,就会造成仪器的损坏。电子产品的跌落按照产品接触地面时的姿态可以分为水平跌落、垂直跌落和角跌落,笔者主要讨论两层包装(缓冲垫、包装箱)的箱装电子仪器垂直跌落的情况,其简化示意图见图 1a。

对于两层包装的箱装电子仪器,在跌落撞击过程中,仅缓冲垫具有缓冲作用,即仪器与包装箱之间可以视为弹性连接。关键部件(液晶显示屏)与仪器整体是焊接在一起的,不能与仪器壳体发生相对位移,故视为刚性连接。所以,两层包装的箱装电子仪器的跌落冲击响应系统可视为自由度弹簧质量系统模型^[4-5](见图 1b)。

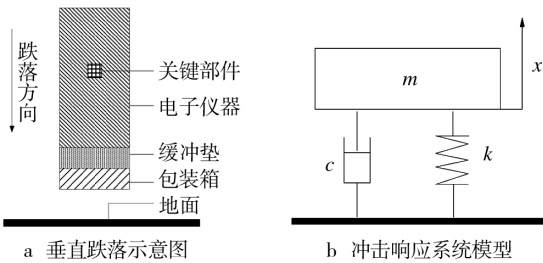


图 1 箱装电子仪器垂直跌落简化示意图
与弹簧质量系统模型

Fig. 1 Sketch map of electronic instruments
packaging drop and spring quality model

假设:包装箱着地时无回弹;电子仪器与其内部的关键部件为刚性连接;缓冲垫材料的弹性模量恒定,不随自身压缩而发生变化;忽略阻尼;缓冲垫无预压,且在跌落过程中未达到压缩极限。

根据以上假设,结合牛顿第二定律,可建立箱装电子仪器跌落冲击数学模型,其微分方程为:

$$m\ddot{x}+Akx=mg$$

(1)

式中: m 为电子仪器的质量; k 为缓冲垫的弹性模量; x 为电子仪器的位移; A 电子仪器的受力面积, g 为重力加速度。

跌落初始条件为:

$x(0)=0;\dot{x}(0)=\sqrt{2gh};\ddot{x}(0)=g;\dot{\ddot{x}}(0)=0$,其中 h 为跌落高度。

根据微分方程和初始条件,可以得缓冲垫无预压、包装箱无回弹时电子仪器的最大位移和最大加速度:

$$x_{\max}=\sqrt{2mgh/(Ak)}$$

(2)

$$\ddot{x}_{\max}=g(\sqrt{2Ak h/(mg)}-1)$$

(3)

若要保证箱装电子仪器在跌落冲击下不受到损坏,则要求:设计时,电子仪器的脆值大于电子仪器所成受的最大加速度,即 $G>|\ddot{x}_{\max}|$,同时缓冲垫的压缩极限大于包装箱的最大位移 $x_{\max}$;储存时,堆垛的最大高度 $h_{\max}$ 要小于临界高度。

2 包装参量的理论设计与仿真分析

针对某型箱装电子仪器,以产品脆值为基础,采用上述方法进行理论计算,分析电子仪器的跌落冲击相应,得到产品设计时缓冲垫需要的压缩极限以及储运堆垛时的最大高度与缓冲垫弹性模量之间的变化关系。利用 AUTO-DYN 有限元分析软件,对电子仪器的跌落进行仿真分析。

2.1 理论设计

以某型箱装电子仪器为例,进行理论设计。其中电子仪器的质量 $m_1=1.94\text{ kg}$,产品垂直跌落时的受力面积 $A=4\,760\text{ mm}^2$,包装箱、缓冲垫、电子仪器及地面的材料参数见表 1,各类产品的脆值^[3](美国军

表 1 材料参数

Tab.1 Parameters of material

部件	材料 性质	密度/ ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$)	弹性模量 /kPa	泊松 比	材料
电子仪器	线弹性	1.06×10^{-3}	4.5×10^4	0.30	高抗冲 PS
包装箱	线弹性	1.06×10^{-3}	2.4×10^4	0.32	GPS
缓冲垫	线弹性	1.2×10^{-4}	8.0×10^2	0.45	EPS
地面	刚性	7.89×10^{-3}	2.1×10^8	0.28	刚体

用标准)见表 2,对于文中要研究的电子仪器,其脆值

表 2 产品脆值表——美国军用标准

Tab.2 Fragility of products in MIL

产品脆值/ g	产品种类
15~24	导弹导航系统,精密校验仪器仪表,陀螺,惯性导航平面
25~39	机械振动测试仪表,真空管,电子仪表,雷达
40~59	航空附属仪表,电子记录装置,大多数固体电器装置,示波器,精密机械零件
60~84	电视机,航空仪表,某些固体电器
85~110	电冰箱,机电设备
110 以上	机器,飞机零件,控制台,液压传动装置

G 在 $(25\sim39)g$ 之间,取中间值 30 g 。

将箱装电子仪器的上述相应参数,代入式(2)和(3),可得某型箱装电子仪器的安全跌落的最大高度 $h_{\max}$ 为 2.399 0 m,与之对应的最大位移为 0.154 8 m,这就要求缓冲垫的压缩极限必须大于 0.154 8 m,储运时的堆垛高度必须小于 2.399 0 m,才能保证产品跌落后不受损伤。

为进一步研究电子仪器的最大加速度和位移与跌落高度和缓冲垫弹性模量的关系,利用 MATLAB 绘制电子仪器的最大加速度随跌落高度和缓冲垫弹性模量变化的曲面图(见图 2)和电子仪器最大位移随跌落高度和缓冲垫弹性模量变化的曲面图(见图 3)。

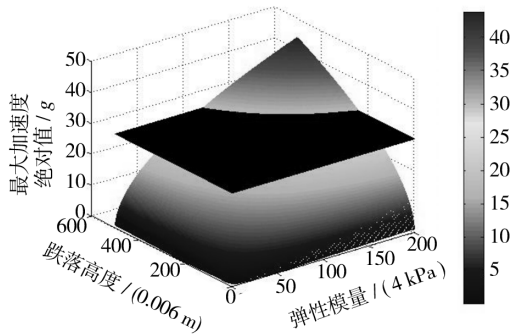


图 2 最大加速度随跌落高度和缓冲垫弹性模量变化的曲面
Fig. 2 Maximal acceleration changing with drop height and elastic modulus of buffer

图 2 中的深色平面为产品的脆值平面 $G=30\text{ g}$ 。通过图 2 可以看出随着产品缓冲垫弹性模量和跌落高度的增加,产品所承受的最大加速度迅速增加,当最大加速度大于产品脆值时,产品就会损坏。随着跌落高度的增加,只有降低缓冲垫的弹性模量才能保证产品跌落时的最大加速度不大于产品脆值;随着缓冲垫弹性模量的增加,产品最大跌落高度逐渐减小。

通过图 3 可以看出相同高度下,弹性模量越小,最大位移越大,而随着弹性模量的增加,最大位移越来越小,且最大的变化趋势也是逐渐变缓的;同时,在相同弹性模量下,最大位移随跌落高度也具有相同的变化规律。

通过图 2 和图 3 可以知道,随着弹性模量和跌落高度的增加,弹性模量和跌落高度对缓冲垫最大位移的影响变得越来越小。

2.2 仿真分析

为更好地分析箱装电子仪器跌落状态下的冲击响应,应用有限元分析软件 AUTO-DYN,对箱装电

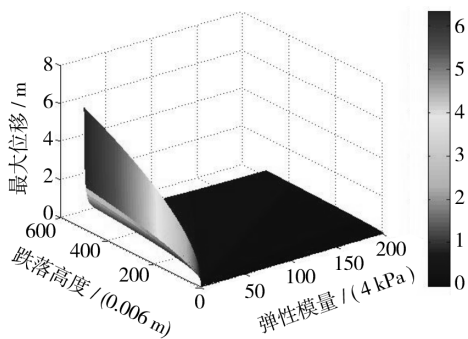


图 3 最大位移随跌落高度和缓冲垫弹性模量变化的曲面
Fig. 3 Maximal displacement changing with drop height and elastic modulus of buffer

子仪器垂直跌落进行仿真分析。

AUTO-DYN 是一个显式有限元分析程序,用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题。它提供很多高级功能,具有深厚的工程背景且已经被应用在大量的工程中,以分析高度非线性问题。箱装电子仪器在跌落时,电子元件所受的冲击大小以及冲击持续时间不仅与包装结构有关,而且与跌落初速度、跌落高度、跌落姿态有关^[6-8]。以箱体垂直姿态落地为例,进行有限元仿真和试验分析。由于 AUTO-DYN 建立复杂的立体模型较难,所以以箱装电子仪器垂直跌落的特征为基础,将其立体模型(见图 4a)简化为平面模型(见图 4b),其有限元网格模型见图 4c,图 4b 中的点 1 是电子仪器的关键部件。为节约计算时间,模型中为箱装电子仪器赋予了初始速度,为仪器从最大跌落高度跌落至地面时的速度;同时模型中给地面添加垂直方向上速度为 0 的约束(将此约束命名为 fixed-y),给包装箱、缓冲垫和电子仪器的侧面添加水平方向上速度为零的约束(将此约束命名为 fixed-x),模型材料参数见表 1。

仿真得到不同时间电子仪器的压力云图(见图 5)和所选关键部件加速与位移随时间的变化曲线(见图 6)。

从图 5 可以看出,等应力线呈水平状态,这是由于垂直跌落假设和约束 fixed-x 造成的理想化状态。同时,可以看出应力随时间具有往复变化的趋势,这是包装箱和缓冲垫的回弹造成的。在云图中电子仪器的集中应力呈线性分布,这是因为垂直跌落假设和模型简化造成的,所以要找应力集中点还需进一步细化模型并对模型的对角跌落进行仿真分析。

由于时间极短,位移无法发生突变,所以位移基

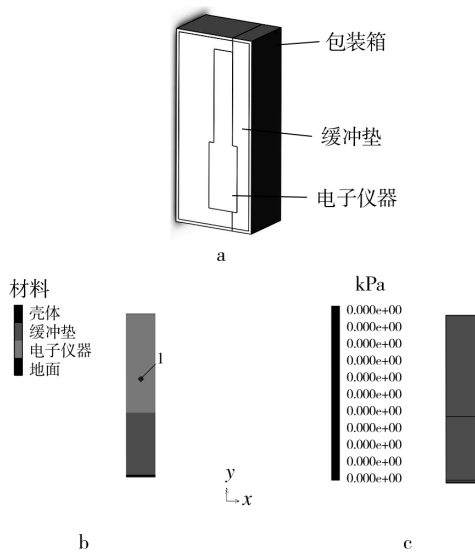


图 4 电子仪器各种模型

Fig. 4 Different models of electronic instruments

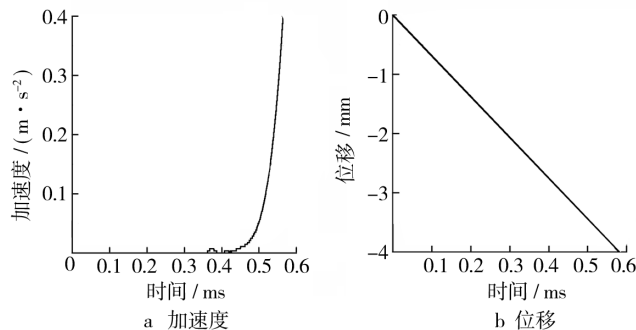


图 6 电子仪器加速度随时间变化曲线

Fig. 6 Change of acceleration of electronic instruments with time

考虑回弹时的理论计算存在较大的局限性。通过以上分析,可知在产品设计中,应首先以跌落时产品的脆值为基础,计算出缓冲垫所能具有的最大弹性模量,进而计算出产品跌落时的最大位移,来确定缓冲垫的压缩极限。

3 结论

对箱装电子仪器受到冲击时,若缓冲时间过短,缓冲垫缓冲距离不足,将会造成产品所受的冲击载荷过大,超过产品脆值,引起产品损伤。通过理论计算与数值仿真的相互对比,并以某型箱装电子仪器为例,研究了两层包装的箱装电子仪器垂直跌落时的最大加速与产品脆值、最大位移与缓冲垫所需压缩极限以及到达最大加速度与最大位移之间的关系。同时确定了产品设计时所需的设计流程,即在保证最大加速不大于产品脆值的情况下,再依次设计缓冲垫的压缩极限、最大弹性模量和产品的最大位移。文中方法为产品包装的优化设计探索了一种有效可行的方法。

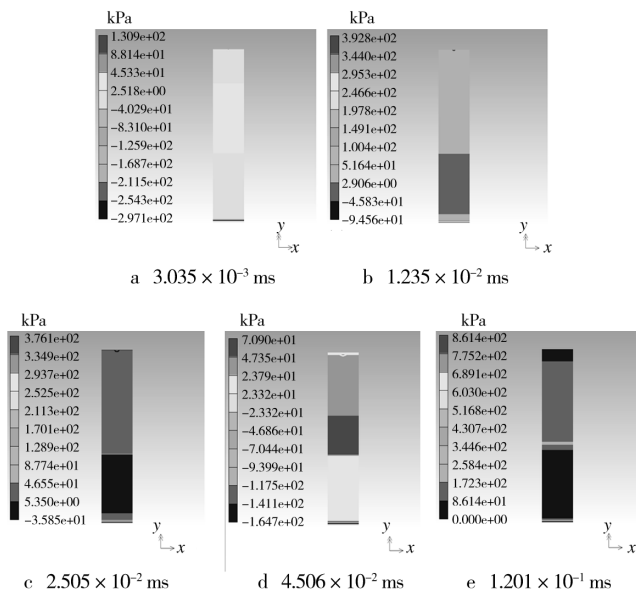


图 5 跌落条件下箱装电子仪器不同时刻的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of electronic instruments packaging drop at different time

本是线性变化的,而加速度初始时基本为 0,因为缓冲垫还未压缩,随着时间的增加,加速度的变化趋势越来越大且有所起伏,这是由于缓冲垫回弹和压力不断增加引起的,符合事实情况。图 6 是以电子仪器达到脆值时的时间为基准截取的。从图 6 中可以看出电子仪器达到最大加速度时约为 0.55 ms,此时电子仪器的位移为 3.75 mm,还未达到最大位移,也就是说最大加速度和最大位移并非同时达到,这也证明不

参考文献:

[1] 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.
[2] 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(2):71-73.

(下转第 85 页)

参考文献:

- [1] 陈全东. 浅谈软包装热封工艺与热封方式[J]. 塑料包装, 2006, 16(4): 29—30.
CHEN Quan-dong. Discussion on the Heat Sealing Process and Sealing Means about Flexible Packaging[J]. Plastic Packaging, 2006, 16(4): 29—30.
- [2] 热合式复膜塑编袋糊袋机安装调试指南[Z]. 青岛: 青岛创新机械制造有限公司, 2008.
Guide for Installation and Commissioning about Heat-formed Film Plastic Weaved Cloth Mouth Sticking Machine[Z]. Qingdao: Qingdao Innovative Machinery Manufacturing Co., Ltd, 2008.
- [3] 历颜池. 复膜塑编糊袋机的热合工艺研究[Z]. 青岛: 青岛创新机械制造有限公司, 2008: 1—2.
LI Yan-chi. Study about Heat Process of Film Plastic Weaved Cloth Mouth Sticking Machine[Z]. Qingdao: Qingdao Innovative Machinery Manufacturing Co., Ltd, 2008: 1—2.
- [4] 董继先, 罗海军, 董超. 糊口包装机同步装置的分析与研究[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 5—7.
DONG Ji-xian, LUO Hai-jun, DONG Chao. Study of the Synchronizer of Mouth Sticking Machine[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6): 5—7.
- [5] 杜深. 复膜塑编糊袋机自动控制系统要求[Z]. 青岛: 青岛创新机械制造有限公司, 2008: 1—2.
DU Shen. Automatic Control System for Film Plastic Weaved Cloth Mouth Sticking Machine[Z]. Qingdao: Qingdao Innovative Machinery Manufacturing Co., Ltd, 2008.
- [6] SINAMICS S120 & SIMOTION D 快速入门[Z]. 北京: 西门子自动化驱动集团, 2005.
Quick Start for SINAMICS S120 & SIMOTION D[Z]. Beijing: Simens Industry Sector, Industry Automation & Drive Technologies, 2005.
- [7] SIMOTION D 系统组态及调试入门[Z]. 北京: 西门子自动化驱动集团, 2007.
Introduction to System Configuration and Commissioning about SIMOTION D[Z]. Beijing: Simens Industry Sector, Industry Automation & Drive Technologies, 2007.
- [8] 罗海军. 复膜塑编袋糊袋机控制系统研究与设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2010.
LUO Hai-jun. Design and Research on Control System of Filmed-plastic-weaved Cloth Sticking Mouth Machine [D]. Xian: Shaanxi University of Science & Technology, 2010.
- [9] 李明辉, 孟宪坤, 李虎. 复膜塑编袋糊袋机控制系统的设计与应用[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 84—87.
LI Ming-hui, MENG Xian-kong, LI Hu. Design and Application of Control System for Film Plastic Weaved Cloth Mouth Sticking Machine[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 84—87.
- ~~~~~
- (上接第 12 页)
- HUA Li. Dropping Simulation Analysis of the Transport Package for Washing Machine Based on Ansys/ls-dyna[J]. Mechatronics, 2008(2): 71—73.
- [3] 高廷如, 于鑫, 高欣宝. 新型炮弹缓冲包装计算方法[J]. 包装工程, 1999, 20(2): 33—35.
GAO Ting-ru, YU Xin, GAO Xin-bao. Calculation Method of New Ammunition Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 1999, 20(2): 33—35.
- [4] 李金明, 安振涛, 丁玉奎, 等. 箱装弹药冲击响应特性研究[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 137—139.
LI Jin-ming, AN Zhen-tao, DING Yu-kui, et al. Study of Ammo Packaging Drop Impact Response[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 137—139.
- [5] 刘功, 赵廷伟. 包装测试技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1989.
LIU Gong, ZHAO Ting-wei. Technology of Packaging Test[M]. Changsha: Hunan University Press, 1989: 289—297.
- [6] 杨小俊, 兰青山, 陈胜. 电热水器缓冲包装的有限元分析及其结构改进设计[J]. 包装学报, 2011, 3(3): 40—44.
YANG Xiao-jun, LAN Qing-shan, CHEN Sheng. The Finite Element Analysis and Improved Structure Design of Cushion Packaging for Electric Water Heater[J]. Packaging Journal, 2011, 3(3): 40—44.
- [7] 宋钊, 郑全成. 利乐砖棱跌落试验仿真研究[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 43—45.
SONG Zhao, ZHENG Quan-cheng. Edge Drop Test Simulation of Tetra Brick Carton[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 43—45.
- [8] 郝智伟, 钱静. 洗衣机关键部件的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 27—29.
HAO Zhi-wei, QIAN Jing. Dropping Simulation Analysis of Crucial Components of Washing Machine[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 27—29.