基于 Hyperworks/LS-Dyna 的包装件跌落仿真及包装优化

李志强^{a,b},任思蓉^a,靳朝晖^a,张素风^{a,b}

(陕西科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要:目的 针对嵌入式洗碗机的包装设计方案进行跌落仿真分析,进一步优化降低方案成本,得出符 合生产制造的轻量化设计理论。方法 首先使用 Hypermesh 与 LS-DYNA 进行联合仿真,模拟包装件六 面工况下跌落的响应情况;其次使用 OptiStruct 优化模块对下衬垫进行拓扑优化设计,根据衬垫变形情 况设置合理优化工况,优化的约束条件加入衬垫制造约束,得到满足包装需求的最轻量化的方案。结果 优 化后的最终方案可制造性加强,成本降低 1.1 元,且优化前后试验采集的易损件响应加速度有不同程度 降低,达到优化目标。结论 轻量化设计理论在包装领域具有普适性,设计完成后,可以通过拓扑优化 的技术路线进一步优化设计方案,降低包装成本,达到降本增效的目的。

关键词:跌落仿真;拓扑优化;降本增效

中图分类号:TB482;TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2020)17-0124-09 DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.017

Packaging Dropping Simulation and Optimization Based on Hyperworks/LS-Dyna

LI Zhi-qiang^{a,b}, REN Si-rong^a, JIN Zhao-hui^a, ZHANG Su-feng^{a,b}

(a.College of Bioresources Chemical and Materials Engineering b.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science &Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: This paper aims to analyze the drop simulation of the embedded dishwasher packaging, to further reduce the solution cost, and finally obtain a lightweight design theory that is consistent with production. The joint simulation was conducted by Hyperworks/LS-Dyna. Firstly, the response of the package to the six-sided drop of working conditions was simulated. Secondly, OptiStruct optimization module was used to have topological optimization on the design of the bottom pad. Optimal working conditions were reasonably set according to the deformation of the pad. Manufacturing constraints were added to the pad to obtain the lightest weight solution that met the test requirements. The manufacturability of the optimized results was enhanced, the cost of the final solution was reduced by 1.1 yuan, and the acceleration response of the vulnerable part collected in the test before and after the optimization was reduced to varying degrees, which was in line with the optimization goal. Light weight design theory is universal in packaging. After the design is completed, the technical route of topology optimization can be used to realize cost decreasing and benefit increasing. **KEY WORDS:** drop simulation; topology optimization; cost decreasing and benefit increasing

随着计算机技术的不断提高,包装件跌落仿真及 结构优化的技术得到了广泛应用,其研究对象从电饭 锅、平板电脑扩大到冰箱、油烟机等大型产品^[1-4], 研究方法从单一工况的拓扑优化逐步拓展到多目标 优化,研究领域涉及到航空、汽车、电子等各个行 业^[5-11]。仿真及优化技术的运用可以在不投入实际生 产和试验成本的前提下对包装方案进行预判,缩短试 验周期,但存在基础数据的缺失问题,由于产品结构

· 125 ·

复杂多样,能够适用于实际应用的理论基础较少,难 以进行定量分析等诸多问题。

包装领域的结构优化技术应用主要分为 2 种类 型,一种用于改善产品结构,提高产品本身抗冲击的 能力,达到提升产品脆值的目的^[12];另外一种用于改 善缓冲方案,对包装方案局部进行尺寸优化、拓扑优 化以及多目标优化,达到轻量化设计或提升缓冲性能 的目的^[3]。通过有限元仿真给出的优化结果可制造性 较弱,往往需要设计师对结构调整后再进行测试验 证。在企业研发端,目前没有能融合产品开发流程的 包装优化理论技术路线,还需研究者结合实际情况继 续探讨。文中通过对某款嵌入式三槽洗碗机的包装设 计方案进行跌落仿真,应用拓扑优化对包装设计方案 进行局部材料优化布局,使设计方案轻量化,达到降 本增效的目的。

1 相关理论

1.1 有限元思想

有限元方法的基本思想由 R.Courant 在 1943 年提 出,随着计算机技术的飞速提高,有限元法得到了快 速发展。有限元的基本思想与微积分相似,简而言之 即"化整为零又积零为整"。通过瞬态动力学分析求解 结构动力学响应的基本运动方程见式(1),整个有限 元求解的过程即为求解大型代数方程组的过程^[13]。

 $[\boldsymbol{M}][\boldsymbol{\ddot{u}}] + [\boldsymbol{c}][\boldsymbol{\dot{u}}] + [\boldsymbol{K}][\boldsymbol{u}] = \{F(t)\}$ (1)

式中: [*M*]为质量矩阵向量; [*C*]为阻尼矩阵; [*K*] 为刚度矩阵; *ü*为节点加速度向量; *u*为节点速度向 量; *u*为节点位移向量。

1.2 拓扑优化理论

拓扑优化是结构优化方式的一种,可以在既定的 空间内给出最佳的材料分布形式。拓扑优化的建模方 法采用密度法,假想材料的密度范围为 0~1,密度接 近 1 的表示材料重要,不能去除,密度接近 0 的表示 材料不重要,可以去除。优化原理是:首先,将模型 离散成有限单元网格,为每个单元计算密度;其次, 在给定的约束条件下,利用近似与优化算法更改材料 的密度值;最后,当目标函数 2 次迭代的目标值相差 小于给定的收敛容差(默认是 0.5%)时,最终收敛 得到优化结果^[14]。优化问题的数学模型需要明确 3 个要素,分别是设计变量,目标函数以及约束条件, 表示为:

求最小值:
$$f(X) = \min f(x_1, x_2 \cdots x_n)$$
 (2)

目标函数:
$$g_i(X) \leq 0$$
 $j = 1 \cdots m$ (3)

$$h_{k}(X) = 0 \qquad k = 1 \cdots m_{k} \tag{4}$$

$$X_i^L \leqslant X_i \leqslant X_i^U \quad i = 1 \cdots n \tag{5}$$

式中: *f*(*X*)为目标函数(各种力学性能或重量); *g*(*X*)为不等式约束函数(各种响应); *h*(*X*)为等式约束 函数(各种响应); *X*为设计变量; *L*为上角标 Lower Limit, 即下限; *U*为上角标 Upper Limit, 即上限。

2 跌落仿真

2.1 前处理

在有限元分析中,前处理的工作量约为整个分析 过程的 80%。首先在 CREO4.0 中对实物模型进行简 化处理,将 186 个零件最终简化处理为 54 个零件, 得到适用于仿真分析的几何模型,对几何模型进行有 限元网格划分,其中,衬垫手动划分 8 mm 的六面体 网格,钣金件抽中面后划分 5 mm 面网格,得到适用 于分析的有限元模型,见图 1。有限元模型的节点数 量和各种类型的单元数见表 1。分析有限元模型网格 类型,面网格总数 163 712,其中三角形网格占比为 1.21%,体网格总数 209 247,其中非六面体网格占比 0.65%。网格质量很好,有利于后期求解过程。碰撞 过程的接触设置使用自动单面接触,可以自动高效地 判断零件之间的接触。



图 1 有限元模型 Fig.1 Finite element model

有限元模型使用的材料模型见表 2,其中,泡沫 材料选择需要导入对应的应力应变曲线,曲线由静态 压缩试验测得^[15]。

为了提高计算效率,将包装件即将落地发生碰撞 的时刻作为初始时刻,将跌落高度转化为包装件的初

表 1 节点和单元数量 Tab.1 Number of nodes of units

包装件有限元模型	节点数	单元数	Tria3	Quad4	Penta6	Hex8
数量	440 522	372 959	1986	161 726	1353	207 894

表 2 材料模型 Tab.2 Material model					
材料名称	密度/(mg·mm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	切向模量/GPa
304 不锈钢	7.93	1.93×10 ⁵	0.3	210	18
结构钢	7.85	2×10 ⁵	0.3	250	14.5
钢化玻璃	2.46	6.89×10^{4}	0.23	0.069	28
灰铸铁	7.2	1.3×10^{5}	0.27	0.2	44
锌合金	6.6	8.5×10^4	0.33		
PP	0.92	896	0.41		
PA	1.12	2620	0.34		
瓦楞纸板	0.15	7	0.34		



图 2 泡沫材料应力应变曲线 Fig.2 Stress-strain curve of foam material

速度作为载荷,同时添加重力加速度,大小为 0.0098 mm/ms²,方向垂直地面^[16]。根据采用的跌落标准,面跌落高度为 450 mm,根据公式 $v_0 = \sqrt{2gh}$,得到换算后的初速度为 2.97 mm/ms。地面采用刚性墙,刚性墙与包装件发生的接触为摩擦接触。

2.2 仿真结果分析

包装件进行面跌落工况求解后, 槽体的速度减小 至 0, 包装件出现反弹现象, 且每个工况下跌落的响 应情况合理, 没有出现零件错位断裂情况。以 1 面跌 落为例(图 3), 查看刚性墙能量变化情况, 在整个 变化过程中, 总能量下降了 4.49%, 误差在 10%以内, 判定仿真结果可靠, 具有参考价值。

在1面跌落工况下,见图4,产品的受力位置是 3个槽体的上部及连接襟片,产品的应力云图与实际 跌落时相同,符合理论情况。在其他面跌落工况下, 产品的受力云图与预期受力部位保持一致,符合理论 情况。通过对包装件 6 面跌落工况下的仿真云图分 析,确定了在跌落过程中看不到的具体受力位置和受 力的大小,下一步需要进一步提取仿真过程中槽体的 响应加速度情况。



图 3 1 面工况能量变化结果 Fig.3 Result of energy change on 1 cloud drop



图 4 1 面跌落(9.4 ms)产品应力云图 Fig.4 Product stress cloud diagram of 1 cloud drop (9.4 ms)

2.3 仿真与试验对比

提取仿真结果中槽体的响应加速度情况,与跌落 试验采集的数据做对比,对比响应加速度的波形及趋 势,响应加速度对比情况见图 5,加速度响应峰值见 表 3。整理响应加速度峰值,观察在各个面跌落工况 下槽体响应加速度的波形、趋势及图形较为符合,数 值误差在可接受的范围内,可判定仿真模型数据可 靠,可以根据仿真结果对包装方案做进一步优化。仿 真数据与试验数据峰值出现误差的原因有很多方面, 如有限元模型进行了一定程度简化,试验采集的数据 存在偶然性等。





表 3	跌落试验数据
Tab.3	Drop test date

跌落工况	试验冲击加速度值(g)	仿真槽体响应加速度(g)
1上面	47.46	57.84
2前面	61.72	73.53
3底面	53.73	60.39
4 后面	32.81	35.48
5 侧轻面	35.05	45.97
6侧重面	30.08	31.33

3 拓扑优化

拓扑优化的目的是局部材料优化布局,实现轻量 化设计。进行该次衬垫拓扑优化时的要素:设计变量 为可设计区域单元的密度,设计目标为可设计区域的 体积最小,约束条件为优化后的衬垫压缩量在不同跌 落工况下的位移小于等于优化前的位移。

3.1 确定设计变量

为了提高轻量化设计的自由度,在进行拓扑优化 分析前,需要对设计空间进行升级,确定设计变量的 范围。首先需要明确的是,缓冲衬垫与产品接触的部 位起到主要缓冲作用, 衬垫的其余位置为连接、成型 作用,没有缓冲效果,因此,要保证原方案的直接接 触部位材料不变,在原有基础上扩充材料,将原垫命 名为 A 垫, 扩大设计空间的衬垫命名为 B 垫。对 B 垫进行区域划分,与原方案相同的主体缓冲结构为不 可设计区域,标为绿色部分;衬垫内部起到连接作用 的部分以及扩大接触位置的部分为可设计区域,标为 黄色部分。此次拓扑优化的设计变量是黄色区域的单 元密度,优化目标是可设计区域体积最小,从而实现 衬垫的轻量化设计。在拓扑优化时,网格的大小对拓 扑结果的精确性影响显著,对B垫进行分析时,重新 划分网格大小为5mm的六面体网格,得到有限元模 型见图 6。







b B 垫

图 6 有限元模型 Fig.6 Finite element model

3.2 确定约束条件

对该次优化的对象下衬垫的 6 面跌落工况分析 可知,1 面跌落和2 面跌落对下衬垫影响很小,因此 拓扑相关工况为3,4,5,6 面跌落。以3 面跌落工 况为例,查看3 面跌落工况下的下衬垫的应力云图, 观察接触部位的受力情况及变形情况,提取瞬态分析 下各个时间点接触区域节点与底面节点的相对位移 数据,分析3 面跌落的最危险时刻,见图 7-8。



图 8 3 面接触区域时间-位移曲线 Fig.8 Time-displacement curve of contact area in 3 conditions

由于产品重心分布不均,云图中衬垫与产品不同 接触部位的变形并不相同,接触部位产生极限压缩的 时刻也不相同。A 区平均极限位移为 23 mm,危险时 刻点为 15.6 ms, B 区平均极限位移为 15 mm,危险时 刻点为 10.2 ms,C 区平均极限位移为 8 mm,危险时 刻点为 10.6 ms。在每个区域内增加刚性节点,主节点 位移为平均压缩量,根据等效静态载荷法得到 A 垫和 B 垫的等效静力载荷。最终主节点的约束条件见表 4。

由表 4 数据, 对 B 垫进行拓扑优化, 其设计变量 是可设计区域每个单元的密度, 目标函数是可设计区 域的体积最小, 约束条件是各个子工况下主节点的位 移小于 A 垫, 对设计区域增加制造约束, 脱模方向 设置为 Z 的正方向, 最大尺寸约束为 60 mm, 最小尺 寸约束为 20 mm, 最终得到的结果满足各个子工况的 约束条件, 并且体积达到最小。 第41卷 第17期

3.3 拓扑优化结果

对衬垫 4 个面跌落工况优化后,得到的衬垫整体 性减弱,增加衬垫整体刚性校核后进一步优化,得到 2 种优化结果,其密度为 0.3 的等值面图,优化后的 结果可制造性大大增强,符合衬垫制造工艺,但尺寸 并不规整,参考 2 种优化结果,得到最终拓扑优化方 案,命名为 C 垫优化结果见图 9。

对比优化前后 A, B, C 垫主节点的位移情况, 见表 5。优化后主节点的位移与原垫基本持平,理论 上满足优化相关的 4 个面跌落需求。

拓扑优化前后, A 垫三维体积为 44 205.3 mm³,

B垫体积为 52 640 mm³, C垫的体积为 41 915.8 mm³, 与 A 垫相比,用量减少了 5%,材料成本降低了 1.17 元;与 B 垫相比,用量减少了 20.37%,材料成本降 低了 4.83 元。拓扑优化在理论上满足衬垫的一定强 度且实现了轻量化设计,为包装方案的设计提供了一 条可行的理论依据,同时也符合企业降本增效的思想。

· 129 ·

3.4 优化后试验验证

制作 C 垫的手板样,密度为 22.5 kg/m³,对优化 后的方案进行试验验证。采集跌落过程中产品的响应 情况。传感器位置始终与跌落试验、脆值试验中保持 一致。在试验采集数据过程中,存在以下误差因素:

Tab.4 Equivalent static force						
区域	合力大小 /kN	F_x/kN	F_y/kN	F_z/kN	位移上限/mm	位移方向
А	34.98	-1.016	-0.123	-35	25.47	-z
В	6.375	-0.2065	-0.3596	-6.361	15.29	-z
С	25.27	-2.022	-0.0194	-25	8.454	-z
D	15.06	-15	-0.2872	-2.866	41.49	-x
Е	22.81	-1.38	-22	-3.613	30.98	-y
F	17.38	-0.2778	-17.19	-2.561	29.47	+y

等效静力

表 4

注:"位移方向"一列中,"+"代表正方向;"-"代表负方向



a 优化方案 0.3 等值面



b 校核后优化方案 0.3 等值面



c B 垫 (优化前)

d C 垫 (优化后)

dC型(优化

图 9 C 垫设计方案 Fig.9 Design scheme of C-pad

Tab.5 Master node displacement before and after optimization				
区域	位移方向	A 垫位移/mm	B垫位移/mm	C垫位移/mm
А	-y	25.47	20.07	24.75
В	-y	15.29	14.77	15.03
С	-y	8.454	4.24	7.40
D	- <i>x</i>	41.49	29.73	41.53
Е	-y	30.98	18.63	29.01
F	+y	29.47	17.4	24.78

表 5 优化前后主节点位移

注:"位移方向"一列中,"+"代表正方向;"-"代表负方向

手板样的衬垫塑性强,表面颗粒粗糙,易发生破损, 同密度下开模件的衬垫整体强度高,缓冲性能好;在 采集数据过程中,跌落冲击发生的位置、角度、不同 试验人员的操作也会使数据产生误差;包装件试验样 品批次不同,缓冲包装材料的批次不同,结构加工误 差会对试验结果有一定影响[17]。为了尽可能减小误 差,试验前检查样机与包材状况,符合出厂状态再进 行打包,2次试验由同一人操作,尽量保持冲击发生 在相同区域。

经过一角三棱六面跌落后,开箱检查产品状况, 产品无损坏。由于衬垫手板样制品的塑性比开模的制 品大很多,底垫吸收跌落工况产生的能量后发生部分 破损,但主体受力部位没有发生分离现象,试验前后 对比见图 10。

优化方案与跌落相关的工况是3,4,5,6 面跌 落工况,分析这 4 个工况下产品的响应数据与 A 垫 跌落试验数据相关的数据,比较峰值以及脉冲宽度, 见图 11。

根据以上优化相关工况采集到的产品响应数据, 发现产品响应趋势保持一致,响应时间大致相同,3, 4,5面的响应峰值均有所减少,6面的响应峰值增加, 产品未出现损坏情况。虽然优化方案采用了轻量化设 计,成本降低,但衬垫强度依然满足跌落工况要求。 比较优化后跌落工况采集的响应加速度峰值与原方 案的差距,评价优化前后产品响应加速度的变化情 况,见表6。

由表 6 可知, 优化后的方案在 10 个跌落工况下, 1上面和6侧重面的响应峰值略有增加,增加程度不 超过15%;其他4个面跌落工况的响应峰值均有不同 程度降低,试验后产品未损坏,说明通过拓扑优化可 找到包装方案的降本空间并给出结构优化的大体思 路,实现了包装方案的降本增效。



a C 垫试验前

bC垫试验后



c E 区





e F 🗵

图 10 C 垫手板样试验前后 Fig.10 Performance before and after C-pad drop test



图 11 优化前后各面跌落响应加速度对比 Fig.11 Comparison of drop response acceleration before and after optimization

表 6 优化前后加速度响应峰值比较 Tab.6 Peak acceleration response comparison before and after optimization

工况	A 垫(g)	C 垫(g)	差值百分比/%	
1上面	47.46	51.37	+8.24	
2前面	61.72	56.63	-8.25	
3底面	53.73	43.69	-18.69	
4 后面	32.81	25.87	-21.15	
5 侧轻面	35.05	31.72	-9.50	
6侧重面	30.08	33.63	+11.80	

方向

4 结语

通过对包装件进行跌落仿真,提取瞬态结果中各 个离散时间点的位移量,计算等效静态载荷,得到拓 扑优化的约束条件,最终获得用于实际制造的轻量化 设计方案,优化方案顺利通过试验测试。轻量化设计 理论在包装领域具有普适性,在设计完成后,通过拓 扑优化的技术路线可进一步降低包装成本,达到降本 增效的目的。

参考文献:

- 崔睿. 智能座便器缓冲包装的跌落仿真与结构优化
 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2017: 3—7.
 CUI Rui. Optimization and Study of the Factors of Intelligent Implement Packaging in Process of Dropping[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2017: 3—7.
- [2] 潘迪, 韩勇, 张坤伦, 等. 液晶电视包装件跌落仿真 及结构优化[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 94—99.
 PAN Di, HAN Yong, ZHANG Kun-lun, et al. Drop Simulation and Structure Optimization of LCD TV Package[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 94—99.
- [3] 李俊. 欧式吸油烟机缓冲衬垫优化设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018, 1—8.
 LI Jun. Optimization Design of Cushion for European

Type Range Hood[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2018: 1—8.

- [4] 张皓佳. 厨电产品缓冲包装优化设计及其应用研究
 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2019: 1—9.
 ZHANG Hao-jia. Optimal Design and Application of Cushioned Package for Kitchen Appliances[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2019: 1—9.
- [5] 高阁. 桁架结构拓扑优化的理论与应用研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2017: 1—20.
 GAO Ge. Research on Theory and Application of Topalacy. Ontimization of Targe Structures[D]. Baijing

pology Optimization of Truss Structures[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Science), 2017: 1—20.

- [6] 刘虎. 结构动力学拓扑优化关键问题研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015: 1—10.
 LIU Hu. Research on Key Issues in Topology Optimization of Dynamic Structures[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015: 1—10.
- [7] LI Hao, DING Xiao-hong, JING Da-lei, et al. Experimental and Numerical Investigation of Liquid-cooled Heat Sinks Designed by Topology Optimization[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 146: 106065—106077.
- [8] LI Qu-hao, XU Rui, LIU Ji, et al. Topology Optimization Design of Multi-scale Structures with Alterable Microstructural Length-width Ratios[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111454—111484.
- [9] 吴凯佳,苏小平. 某工程车辆车架的结构动力学分 析与优化[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 688—694.
 WU Kai-jia, SU Xiao-ping. Structure Analysis and Optimization of a Heavytruck Frame[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2019,
- [10] LI Dong-feng, ANDREA D R, CHEN Gang, et al. Aeroelastic Global Structural Optimization Using an Efficient CFD-based Reduced Order Model[J].

41(6): 688-694.

Aerospace Science and Technology, 2019, 94: 105354—105367.

- [11] ZHANG G Q, DU Y F, LI X Z, et al. Parametric Design and Multi-objective Optimization of LCD Packaging Cushion Foams[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 32—36.
- [12] 石然然,刘超,元春峰. 笔记本跌落仿真分析及优化
 [J]. 制造业自动化, 2015, 37(17): 41—43.
 SHI Ran-ran, LIU Chao, YUAN Chun-feng. Laptop Drop Simulation Analysis[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(17): 41—43.
- [13] 岑轶浩. 基于 CAE 分析的乳液泵弯嘴零件注塑模具 优化设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017: 1—5. CEN Yi-hao. Optimization Design of Injection Mould for Bending Parts of Emulsion Pump Based on CAE Analysis[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017: 1—5.
- [14] 韩帅. 拓扑优化方法在复合地基处理桥头跳车中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 1—9.
 HAN Shuai. Model Test and Numerical Simulation of Optimization of Gravel Pile Composite Foundation[D].
 Yangling: Northwest A&F University, 2017: 1—9.
- [15] GB/T 8168—2008,包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
 GB/T 8168—2008, Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials[S].
- [16] 刘刚,王海波,苏炳超.基于 Hyperworks/LS-Dyna 的一种新型空调器室内机的跌落仿真分析[J].家电 科技,2017(1):58—61.
 LIU Gang, WANG Hai-bo, SU Bing-chao. Dropping Simulation and Analysis of a Novel Inner Air-conditioner Basing on Hyperworks/LS-Dyna[J]. China Appliance Technology, 2017(1):58—61.
- [17] 滑广军,费伟民,谢勇. 缓冲包装跌落仿真误差分析
 [J]. 包装工程, 2016, 37(13): 54—59.
 HUA Guang-jun, FEI Wei-min, XIE Yong. Drop Simulation Errors of Cushioning Packaging[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 54—59.