

产品跌落冲击耐撞性能稳健设计研究进展

杨书仪^{1,2}, 刘德顺¹, 赵继云², 文泽军¹

(1. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221008)

[摘要] 跌落冲击是物体在短时间内受到强大冲击力而运动状态发生急剧变化的现象, 是导致产品特别是小型机电产品外表破损、功能失效的主要原因。近年来, 国内外研究学者针对如何提高产品抗跌落冲击的本质耐撞性能进行了大量研究。笔者从研究对象、研究方法等角度, 系统总结了产品跌落冲击耐撞性和产品耐撞性能稳健设计的研究现状, 归纳了有待进一步研究的问题。

[关键词] 跌落冲击; 耐撞性; 稳健设计

[中图分类号] O32; TN406 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)01-0061-06

1 前言

随着科学技术的进步以及人们生活水平的提高, 小型机电产品特别是便携式电子产品在日常生活中得到极大的应用, 包括手机, 数码相机, 笔记本电脑、MP3 录放机, 移动硬盘等。由于产品的便携性使得消费者在携带或使用过程中将其失手跌落的意外时有发生, 从而导致产品的破损, 如手机机壳分离、LCD 屏幕的破损、PCB 板上芯片焊点的松动、脱落等。由于跌落冲击中物体动量的传递是在极短时间内进行的, 因而与其他形式的激励相比, 产品跌落冲击力最为强烈, 是导致小型机电产品外表丧失美观、内部工作性能下降、甚至使用功能丧失^[1,2]的主要原因。而且, 作为精密的高科技产品, 便携式电子产品往往价格不菲, 且其损坏带来的隐形损失甚至超出产品本身价值, 如误工、重要数据的丢失甚至错失商业机会, 还有可能造成人身安全问题等。因而, 消费者购买产品时, 在满足基本功能的条件下会更加青睐有着良好耐撞性能的产品。产品的跌落冲击耐撞性能已成为产品质量的重要特性和产品的核心竞争能力。

笔者主要对产品的跌落冲击耐撞性在试验研

究、数值模拟和耐撞性评价, 以及产品跌落冲击耐撞性的稳健设计研究现状等几个方面做了论述, 并讨论其有待进一步研究的问题。

2 产品跌落冲击耐撞性研究

2.1 电子产品的跌落冲击耐撞性研究

早期的产品跌落冲击耐撞性研究工作主要集中在缓冲包装工程领域, 从 1945 年 Mindlin 发表的奠基性论文《Dynamics of Package Crushing》开始, 一直为研究者们所关注^[3,4]。由于电子产品应用的普遍性和自身价值的重要性, 大部分跌落冲击耐撞性研究主要集中在电子产品上, 其研究一般在产品、集成电路板两个层次上进行。在产品级方面, Kumar^[5], Lin^[6] 对计算机硬盘驱动器、Lim^[7] 对寻呼机, Kim^[8], 李在伟^[9] 对手机, Wang^[10] 对音像机, Low^[11,12] 对电烫斗、电视机等产品进行了较为系统的试验研究和数值仿真, 主要关注产品内的电子元器件的应力应变。在板级方面, 由于贴片工艺的发展, 芯片与电路板之间的细小焊点就成为了受跌落冲击最易损坏部分, 这也直接影响产品的质量。Luan^[13], Lai^[14] 通过试验和仿真对焊点的牢固性进行研究, 结果表明, 焊点的开裂、裂纹扩展以及断开

[收稿日期] 2008-04-01; **修回日期** 2008-12-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50575072); 湖南省教育厅科研项目(07C280); 湖南省自然科学基金资助重点项目(09JJ3093)

[作者简介] 杨书仪(1972-), 女, 湖南湘潭市人, 湖南科技大学副教授, 研究方向为工程稳健优化设计、机电控制等; E-mail: ysy822@126.com

这一系列过程是随着电路板受冲击弯曲变形而来的。Ong^[15]还针对产品级和板极跌落冲击试验的PCB力学响应进行了比较,研究表明由于板极跌落冲击方案的单一化,使得板极与产品级跌落冲击响应存在误差。

2.1.1 试验研究

跌落冲击是一种破坏性试验,往往从实物试验中分析产品的动态响应,探讨破损机理,为产品设计时识别其失效提供评价方法。跌落冲击的试验设备大多是在跌落试验台上进行,在产品的观测点上安装加速度传感器和贴应变片,通过高速摄像机拍摄跌落姿态的变化,采集卡、示波器等信号处理装置实现试验数据的记录和观测,这为进一步的研究提供了基础。

Lim和他的研究小组在自行设计的跌落机上进行了一系列的实验,比较了不同型号的手机在不同碰撞角度下,电路板上的应变、加速度和冲击力等响应参数^[16,17]。实验表明,水平方向的冲击载荷通常能引起手机上印刷电路板最大的加速度和应变响应,因而是最值得注意的。Wu^[18]在跌落试验室对摩托罗拉手机在跌落冲击下整机结构、天线的弯曲、LCD屏幕的破裂等进行了分析。朗讯公司的Goyal^[19]通过高速摄像机拍摄了手机跌落过程电池后盖与机身分离的状态变化,分析了分体式产品在跌落冲击过程中部件分离、撞击、变形破坏机理,研究指出改进后盖的结构可以提升产品抗跌落冲击的性能。Luan^[13],Lai^[14]利用试验设备在跌落试验机上对电路板受冲击过程进行了测量和记录,分析了电路板的模态响应,指出电路板的冲击响应以一阶模态为主,通过实时的焊点电阻变化测量发现焊点发生断裂的原因是振动引发的周期疲劳。

2.1.2 数值模拟

在实际生产中,一旦对产品进行改进,其实物试验必需等到样机生产出来才能进行。在试验中所获得的冲击响应信息是有限的,且测试系统所造成的数据误差也是不可避免的。随着有限元分析软件和计算机技术的迅速发展,计算机模拟测试已经成为一种可以替代实际测试的研究方法。

Ren^[20]采用梁单元和壳单元的简化模型对电路板的冲击响应进行了数值仿真,与未简化的模型相比结果相符。Lim^[7]采用壳单元和实体单元简化寻呼机外壳、电路板以及电机等零件,在ABAQUS/Explicit软件上进行跌落冲击数值仿真。Tee^[21]对各

种封装形式的芯片进行数值模拟,并建立了焊点失效模型,其失效预测误差为 $\pm 13\%$ 。Low^[22]对微型高保真音响设备利用Pro/E建立模型,用PAM-CRASH软件对其进行跌落冲击仿真,重点研究变压器安装板的冲击变形,软件分析结果与3D探测器测量结果相接近。Edwards^[23]用有限元模型分析了硬盘驱动器在跌落撞击地面时的瞬时动态响应,用加速度、速度、位移等的时间曲线解释了为什么硬盘驱动器对0.5~1ms的冲击响应最敏感。Low^[12]采用虚拟边界法对电视机的包装元件(如结构复杂的缓冲垫)进行网格划分简化,减少了大量的CPU计算时间,从而为设计者更快的提出设计方案节省了时间。Tee^[21],Luan^[13],Lai^[14]等均采用实物试验和数值模拟的方法对PCB板从焊点的脱落、芯片的松动、板子的弯曲、破裂等几方面进行研究,为PCB板抗跌落冲击的进一步理论研究和产品设计奠定了基础。

相比实物测试,数值仿真不仅节省时间和成本,而且能获得更为详细、全面的数据信息,为产品设计提供保障。虽然产品跌落冲击数值仿真还有待进一步深入和完善方可达到期待的水平,但却为产品耐撞性设计提供了高效的预测工具,可取代或减少样机试验,有利于提高产品开发效率和减少开发成本。

2.2 非电子产品的跌落冲击耐撞性研究

由于运输、存储、使用过程中的不慎跌落对非电子产品的损伤,也是导致这类产品失效的主要原因,并一直被人们所关注。Marco^[24]对飞机底层油箱在紧急情况下撞击地面时的破损行为进行了试验研究,并采用不同算法进行有限元分析,寻找出最符合实际的数值仿真方法。Reed^[25]对常见的塑料液体容器进行实验和理论研究,为提高产品的耐撞性提供了依据。王春霖^[26]对玻璃啤酒瓶进行了跌落冲击仿真应力分析,获得了储酒和空瓶平跌落、斜跌落两种典型工况下的应力分布规律,对玻璃容器冲击强度的理论研究和结构优化设计进行了探索。卢立新^[27,28]以“富士”苹果为研究对象,将力传感器通过螺柱连接固定在试验机底座上,同时在力传感器上固定一铝托盘(直径50mm,厚度2.5mm)以增加碰撞面积,实施多个高度下的跌落冲击试验,进行动态流变模型的参数识别,提出表征苹果在非损伤条件下的非线性粘弹性的本构模型与模型参数识别方法,为其合理运输包装设计提供了理论基础。

2.3 耐撞性能评价

目前产品的耐撞性能是通过设计相关样机跌落

试验来保证,如在电子行业中,为了保证电子产品的抗冲击性能,一般要求产品通过某种通用的标准测试。适用的标准有,美国国防部的美国军用标准 MIL-STD-810E“环境考虑的测试方法标准和实验室测试”^[29,30];国际电工委员会提供的 IEC 68-2-27“基本环境试验规程国际标准”^[31];电子工程设计发展联合会提供的一系列针对手持式电子产品测试标准草案^[32];我国也颁布了相关产品的国家标准,如 GB/T2423.8-1995,GB13508-92 等^[33],这些标准主要是对测试仪器、测试方法的标准化规定。在产品的耐撞性能评价方面,常用零件破损时的产品加速度值描述产品的耐撞性能。例如,缓冲包装设计中采用的产品强度指标就是从各种波形的产品破损边界曲线中抽象出来的脆值。

由于产品跌落冲击破损有各种各样的形式,如断裂、松动、表面凹陷、擦伤等,只将产品最大加速度值作为耐撞性评价指标往往是不够的。Suhir^[34]指出作为动态强度的评价标准,尽管产品加速度值容易测量,但当制定电子产品结构零件的动态强度等级及其影响因素时,理论上应校核其动态应力值。而且如果针对不同尺寸、重量、材料的元件,其加速度值作为评价标准将会引起歧义。

3 产品耐撞性能稳健设计研究

3.1 产品耐撞性能随机不确定性

目前产品耐撞性是根据规范的(有限的)跌落冲击试验(仿真)进行评估,产品设计中并没有考虑产品实际使用中多样的(无限的)跌落冲击条件和由此引发的随机不确定性。产品跌落冲击耐撞性设计中的不确定性主要表现在以下几方面。

3.1.1 跌落冲击参数的随机不确定性

跌落冲击参数主要包括跌落初速度、跌落角度、跌落高度、地板刚度、冲击摩擦系数等。在产品跌落耐撞性设计中,冲击速度取决于跌落高度,而产品跌落高度既与产品自身的质量、形状、体积有关,又与产品运输、使用条件和环境有关,呈现出较大的随机不确定性,图 1 显示了不同质量的产品跌落高度的随机性。

3.1.2 产品设计参数的不确定性

在制造加工使用过程中,产品的结构、材料和工作条件存在不确定性。常规的机电产品耐撞性设计是确定性设计,不考虑这些不确定性因素的影响,因而导致设计方案要么对不确定因素变化过于敏感而

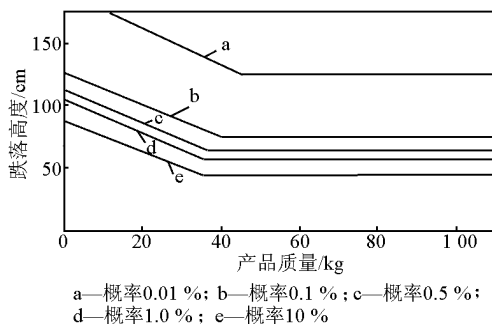


图 1 产品跌落高度的概率

Fig. 1 Probability of drop height

不可靠,要么采取增大安全系数的保守措施而不经济,由此引起的体积和重量增加。所以,必须在产品设计阶段就考虑到产品加工使用过程中的不确定因素,并对各设计变量和参数的不确定性对产品的耐撞性能的影响进行分析与评估,从而设计出高品质的产品。

3.1.3 跌落冲击参数的不确定性导致产品耐撞性能的不确定性

由于跌落冲击的强非线性和产品结构的复杂性,产品设计参数与耐撞性的不确定性传递关系异常复杂。不同的设计参数值在非线性的传递关系下会导致不同的产品性能。跌落冲击参数不同,产品的损坏程度就不同,即产品耐撞性能不同。因而,跌落冲击参数的随机不确定性必然导致产品耐撞性能的随机不确定性。Lai^[14]应用试验和数值仿真研究了电路板抗跌落冲击的可靠性与 4 种跌落测试条件(如表 1 所示)的关系,图 2 显示在 A 条件下,电路板抗冲击次数最多,耐撞性能最好;在 H 条件下,电路板耐撞性能最差。

表 1 跌落测试条件

Table 1 Drop test condition

条件	最大加速度/G	脉冲持续时间/ms	速度变化值/(m·s ⁻¹)
A	500	1.0	3.16
F	900	0.7	3.86
B	1 500	0.5	4.67
H	2 900	0.3	5.49

3.2 耐撞性能稳健设计

通过设计减小不确定因素对产品质量的影响是稳健设计(Robust Design,也称为健壮设计或鲁棒设计)的基本理念。稳健设计通常认为源自于日本 Taguchi 在二战后提出的产品质量管理思想^[35]。在

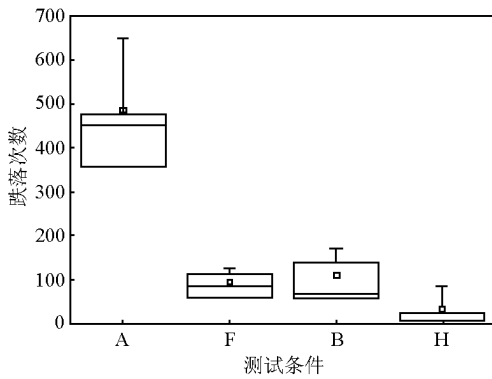


图2 不同测试条件下焊点脱落的冲击次数分布
Fig.2 Distribution of welding point shed on different test condition

Taguchi 方法注入了许多新的内容并得到广泛应用。在产品跌落冲击耐撞性方面, Lim^[16] 在 2002 年首次将稳健设计概念引入到便携式电子产品的设计上, 指出对电子产品及其包装件的跌落机理进行透彻理解有助于产品抗跌落冲击可靠性和稳健性设计; Wang^[10] 在 2003 年也将稳健设计运用到视听设备电机输出轴抗跌落冲击上, 通过试验研究和数值仿真表明, 在不同方向上电机轴的跌落冲击破坏程度不同。Wang 还应用蒙特卡洛方法进行产品可靠性分析, 改进设计参数, 得到了更为稳健的设计结果, 其设计流程如图 4 所示。

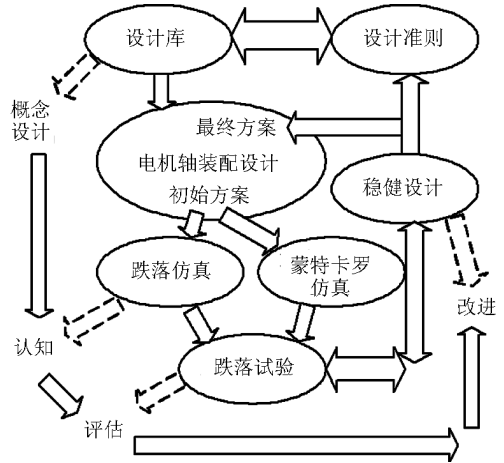


图4 产品跌落冲击耐撞性稳健设计流程
Fig.4 Robust design flow of product collision-resistant

当时设计还是基于经验和试凑的年代, Taguchi 提出了用正交表进行试验, 综合考虑产品在环境条件变化情况下的信噪比和损失函数来确定产品设计方案。Taguchi 设计方法的基本思想是, 在不消除和减小不确定性源的前提下, 通过设计使不确定性因素对产品质量的影响尽可能小。一般设计(包括优化)是建立在产品性能(这里泛指系统响应)和产品设计变量(这里指系统输入, 包括可控因素和不可控因素)的关系之上的, 即 x 与 y 的关系。稳健设计不仅要求上述关系, 而且还要掌握设计变量不确定性到产品性能不确定性的传递规律, x 的分布通过关系 f 引起 y 的分布, 如图 3。在产品设计中, 只有掌握了产品设计参数、跌落冲击参数与耐撞性能的关系, 以及不确定性传递规律, 才能获得产品稳健设计方案(设计参数)。这种设计方案能保证在设计参数和跌落冲击随机不确定性不增加额外控制的前提下, 产品仍然具有良好的耐撞性能。

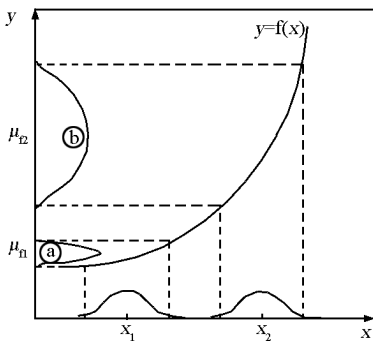


图3 产品性能与设计变量
Fig.3 Product performance and design variable

4 有待进一步研究的问题

虽然产品跌落冲击耐撞性设计已开始引起人们的关注, 但在产品跌落冲击耐撞性能数值仿真、耐撞性评价和优化建模等方面还有待进一步研究。

1) 有限元模型的建立。模型的简化, 由于产品零部件的结构复杂, 需将其合理简化建立有限元模型才能真实反映产品的动力学特性, 否则结构差异必然导致产品破损机理的不同, 给跌落冲击的数值仿真和耐撞性设计带来新问题; 参数的选取, 由于材料本构模型信息、接触条件参数等的未知和不确定性, 使得数值仿真结果不准确可靠。

2) 产品跌落冲击耐撞性性能函数的数学模型建立。由于跌落冲击参数(跌落初速度、跌落角度、跌落高度、地板刚度、冲击摩擦系数等)、产品设计参数(产品的结构、材料、工作条件等)分布的随机不确定性, 以及产品跌落冲击系统的强非线性, 很难

随着计算机技术和数值方法的普及和发展,

应用常用的一阶或二阶响应面来构成数值仿真评价的替代模型。

3)耐撞性能评价方法。由于产品跌落情况的复杂性,如何选取评价指标和评价标准作为产品跌落冲击耐撞性的衡量标准,使其能真实反映产品的破损情况。

4)产品跌落冲击耐撞性设计是一个多因素多性能、复杂的技术经济问题。当以耐撞性能为目标时,还必须考虑产品体积、重量、制造、成本等方面的制约,产品耐撞性能稳健设计是一个目标、目标稳健性和方案可行稳健性相结合的多目标优化过程。

5 结语

运用稳健设计方法提升产品的耐撞性能是提高产品质量、降低产品成本、增加产品市场竞争力的有效手段。随着计算机技术水平的发展,传统的设计、样机试制、跌落试验、改进产品的耐撞性设计模式正被计算机辅助设计、有限元仿真等取代,若将稳健设计理念融入到 CAD/CAM 中去,其运用前景将更为广阔。

参考文献

[1] 汤伯森,向红. 包装动力学[M]. 长沙:湖南大学出版社, 2001

[2] 刘德顺,李夕兵. 冲击机械系统动力学[M]. 北京:科学出版社,1999

[3] Gonsalves D H. The dynamics and design of a nonlinear vibration absorber [J]. Part C:Journal of Mechanical Engineering Science, 1993, 207:363 - 374

[4] 杨平. 非线性抗振动冲击防护动力学与动态设计[M]. 北京:国防工业出版社,2003

[5] Kumar S, Khanna D V, Sri - Jayantha M. A study of the head disk interface shock failure mechanism[J]. IEEE, Transactions on Magnetics, 1994, 30(6):4155 - 4157

[6] Lin C C. Finite element analysis of computer hard disk drive under shock[J]. ASME, Journal of Mechanical Design, 2002,124:121 - 125

[7] Lim Ch T, Teo Y M, Shim V P W. Numerical simulation of the drop impact response of a portable electronic product[J]. IEEE, Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3):478 - 485

[8] Kim J G, Park Y K. Experimental verification of drop/impact simulation for a cellular phone[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(4):375 - 380

[9] 李在伟,梁新华. 应用有限元技术进行手机结构碰撞仿真[J]. 中国制造信息化,2004,10:86 - 87

[10] Wang Y Y, Lin T Y. Drop - impact simulation and experimental verification for spindle fixation of video and audio module [J].

Mechatronics,2003, 139(5):427 - 447

[11] Low K H, Wen J. Parametric study on drop/impact effects of an iron product[A]. Proceedings of the Fourth Asia - Pacific Conference on Shock& Impact Loads on Structures[C]. Singapore, 2001,433 - 442

[12] Low K H, Wang Y Q, Hoon K H, et al. A virtual boundary model for a quick drop - impact analysis of electronic components in TV model[J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35(8 - 9):537 - 551

[13] Jing - en Luan, Tong Yan Tee, Eric Pek, et al. Dynamic responses and solder joint reliability under board level drop test[J]. Microelectronics Reliability, 2007,47:450 - 460

[14] Yi - Shao Lai, Po - Chuan Yang, Chang - Lin Yeh. Effects of different drop test conditions on board - level reliability of chip - scale packages[J]. Microelectronics Reliability, 2007: 1 - 8

[15] Ong Y C, Shim V P W, Chai T C, et al. Comparison of mechanical response of PCBs subjected to product - level and board - level drop impact tests[A]. Proceedings of the 5th Electronics Packaging Technology Conference[C]. IEEE,2003. 223 - 237

[16] Lim C T, Low Y J. Investigating the drop impact of portable electronic products[J]. Electronic Components and Technology Conference,2002:1270 - 1274

[17] Lim C T, Ang C W, Tan L B, et al. Drop impact survey of portable electronic products[A]. Proceedings of the 53rd Electronic Components and Technology Conference[C], 2003 - 05 - 27 ~ 30, IEEE,2003. 113 - 120

[18] Wu J, Song G, Yeh C P, et al. Drop/impact simulation and test validation of telecommunication of telecommunication product [A]. Proceeding of Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic System [C]. ITherm'98, IEEE. 1998 - 05 - 27 ~ 30:330 - 336

[19] Goyal S, Upasani S, Patel D M. Improving impact tolerance of portable electronic products: Case study of cellular phones[J]. Experimental Mechanics, 1999, 39(1):43 - 52

[20] Ren W, Wang J J. Shell - based simplified electronic package model development and its application for reliability analysis [A]. Proceedings of the 5th Electronic Packaging Technology Conference (EPTC 2003) [C]. Singapore, 2003 - 12 - 1012. IEEE. 2003. 217 - 221

[21] Tee T Y, Ng H S, Yap D, et al. Impact life prediction modeling of TFPGA packages under board level drop test[J]. Microelectronics Reliability, 2004,44:1131 - 1142

[22] Low K H, Yang A, Hoon K H, et al. Initial study on the drop - impact behavior of mini Hi - Fi audio products[J]. Advances: in Engineering Software, 2001, 32(9): 683 - 693

[23] Edwards J R. Finite element analysis of the shock response and head slap behavior of a hard disk drive[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(2): 863 - 867

[24] Marco Anghileri, Luigi - M L Castelletti, et al. Fluid - structure interaction of water filled tanks during the impact with the ground [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31:235 - 254

- [25] Reed P E, Breedveld G, Lim B C. Simulation of the drop impact test for moulded thermoplastic containers[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24:133 - 153
- [26] 王春霖, 张丽强, 王振林. 基于 ANSYS 的跌落仿真应力分析[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 23 - 25
- [27] 卢立新, 王志伟. 跌落冲击下果实动态本构模型的构建与表征[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 238 - 241
- [28] 卢立新, 王志伟. 苹果跌落冲击力学特性研究. 农业工程学报[J], 2007, 23(2): 254 - 259
- [29] 周春燕, 余同希, 李世玮. 便携式电子产品的跌落冲击响应—试验, 仿真和理论[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 239 - 246
- [30] MIL - STD - 883F. Military standard: Test methods and procedures for microelectronics[S]. Washington DC: US Office of Naval Publications, 2004
- [31] IEC 68 - 2 - 27. International standard: Basic environmental testing procedures[S]. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1987
- [32] JESD22 - B104 - B. Mechanical Shock Test Method[S]. JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, 2001
- [33] GB13508 - 92. 聚乙烯吹塑桶[S]. 国家技术监督局 1992 - 06 - 12 批准
- [34] Suhir E. Is the maximum acceleration an adequate criterion of the dynamic strength of a structural element in an electronic product Coriapo Pack Adec[J]. IEEE, 1997, 20(4): 513 - 517
- [35] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 12

Research progress in robust design of products, drop impact strength

Yang Shuyi^{1,2}, Liu Deshun¹, Zhao Jiyun², Wen Zejun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, HuNan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

[Abstract] Drop impact is an phenomena that object movement state arises sharp change when it gets strong wallop in a short time and is a chief reason for minitype electromechanical products appearance breakage and function failure. How to improve products, shock resistance and essential crashworthiness has been studied by domestic and foreign scholars for many years. Research status of products, shock resistance and crashworthiness robust design are recommended. Research techniques are systemically analyzed. And existential questions are summarized.

[Key words] drop impact; crashworthiness; robust design