

就地化保护装置跌落冲击载荷下的可靠性分析

王新春^{1,2}, 周华良^{1,2,3}, 郑立亮^{1,2}, 夏雨^{1,2}, 甘云华^{1,2}, 周辉^{1,2}

(1.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 南京 211106; 2.国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106; 3.智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 南京 211106)

摘要: **目的** 为了评估就地化保护装置跌落冲击载荷下的失效情况。**方法** 基于显式动力学理论, 采用有限元法对就地化保护装置进行跌落冲击的建模仿真。分析 PCB 板变形与焊点失效之间的关系, 探讨元件封装方式对产品抗跌落冲击性能的影响, 提出以 Von Mises 准则得到的焊点最大应力联合跌落寿命模型, 进行元件封装可靠性评估的分析方法。针对元件不同封装方式的装置进行跌落验证试验。**结果** 就地化保护装置跌落冲击仿真结果与试验结果基本吻合。**结论** 验证了评估元件封装失效分析方法的准确性, 为推断产品可靠性提供了理论支撑。

关键词: 就地化保护装置; 跌落冲击; 可靠性; 有限元

中图分类号: TB482.2; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)13-0160-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.023

Reliability Analysis of In-situ Protection Devices under Drop Impact Loading

WANG Xin-chun^{1,2}, ZHOU Hua-liang^{1,2,3}, ZHENG Li-liang^{1,2}, XIA Yu^{1,2}, GAN Yun-hua^{1,2}, ZHOU Hui^{1,2}

(1.NARI Group Corporation State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2.NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3.State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the reliability of in-situ protective devices under drop impact load. Based on explicit dynamics theory, the finite element method (FEM) was used to simulate the drop impact of in-situ protective devices. The relationship between PCB plate deformation and solder joint failure was analyzed, and the influence of component encapsulation on drop impact resistance of products was discussed. An analytical method for evaluating component encapsulation failure was proposed based on maximum stress on Von Mises and life prediction model. Drop tests were carried out for different encapsulation modes of components. The results show that the simulation results of drop impact of in-situ protective devices were basically consistent with the experimental data. The accuracy of failure analysis method for component encapsulation is verified, providing theoretical support for inferring product reliability.

KEY WORDS: in-situ protection device; drop impact; reliability; FEM

智能变电站二次设备就地化保护装置, 能够改善传统设备接口的形式陈旧、回路复杂、可靠性低等缺点^[1-2], 实现了安装调试和运行维护的高效施工, 满足小型化、便于检修的发展需求^[3-4]。就地化保护装置需要面临严酷的气候环境、电磁环境以及机械环境^[5-6]。国家电网标准提出装置需要满足高度 1 m 条

件下的跌落试验要求, 这需要就地化保护装置具有较高的可靠性。所谓可靠性是指产品在规定的时间内, 规定的条件下无故障地完成其规定功能的概率。就地化保护装置的可靠性主要取决于内部 PCB 板在跌落冲击过程中电子封装的可靠性, 即焊点是否发生失效。

收稿日期: 2019-01-21

作者简介: 王新春(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力设备结构设计与仿真优化。

目前，就地化保护装置的研究主要集中在电气性能方面，跌落冲击可靠性分析的研究甚少。杨雪霞等^[7]研究了表贴焊点在跌落冲击过程中的可靠性，但是针对的模型是单独的 PCB 测试板。Tee 等^[8-9]进行跌落冲击仿真分析，研究了元器件位置、不同封装类型和跌落方向对封装的影响，并且提出了 Input-G 方法。刘芳^[10]博士研究了跌落碰撞下板级连接 SMT 无铅焊点失效规律与提高焊点可靠性的方法，并发展了一种全新跌落碰撞下焊点寿命的可靠性测试与可靠度评估方法，但研究采用的是测试板。王文等^[11]对不同跌落高度下焊点的寿命进行对比研究，推导出了寿命评估模型。所见文献中研究对象主要为 PCB 测试样板，得出了 PCB 板跌落的最严酷工况以及 PCB 板弯曲变形是焊点失效的主要原因等结论，但文献中未针对实际产品分析讨论 PCB 板的安装方式以及元件插装方式对焊点失效造成的影响。

文中以就地化保护装置为研究对象，分析焊点失效的影响因素，借助寿命预估模型评估产品可靠性。首先采用有限元法，建立就地化保护装置的力学仿真模型，分析装置跌落冲击动力学响应。然后根据仿真结果分析 PCB 板变形对焊点失效的影响，探讨元件封装对产品抗跌落冲击性能的影响，并对封装的寿命进行评估。最后试验验证仿真结果与试验结果的一致性，为预估产品可靠性提供依据。

1 就地化保护装置力学模型建立

1.1 显式动力学理论

就地化保护装置跌落冲击属于非线性动力学领域中的瞬态响应问题，此类问题利用显式动力学理论能够得到快速解决。

在跌落冲击仿真分析中，系统的求解方程式为^[12-13]：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P - I \quad (1)$$

式中： \ddot{u} 为加速度； P 为广义外作用力； I 为单元的广义内力； M 为质量矩阵； K 为刚度矩阵； C 为阻尼矩阵。

对于单个节点，阻尼矩阵和刚度矩阵为 0，所以单个节点平衡方程转化为：

$$M\ddot{u} = P - I \quad (2)$$

$$\ddot{u}|_{(t)} = (M)^{-1} \cdot (P - I)|_{(t)} \quad (3)$$

$$\dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{(\Delta t|_{(t+\Delta t)} + \Delta t|_{(t)})}{2} \ddot{u}|_{(t)} \quad (4)$$

$$u|_{(t+\Delta t)} = u|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{u}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (5)$$

利用显式动力学求解复杂的非线性问题时，不必联立方程组进行求解，每一个增量步的计算成本很低，有效提高了计算效率。

1.2 有限元模型的建立

研究的就地化保护装置质量为 7.85 kg，外壳采用铝合金材质，装置内部安装有 PCB 板、互感器、导热板等器件，理论上对产品可靠性影响最大的是装有较多互感器的 PCB 板，将该组件作为重点分析对象。装置简化后的力学等效模型见图 1，内部安装件重点考虑了 PCB 板、互感器以及导热板；利用质量点和非结构质量使整个模型的重量与实际重量接近。互感器上的焊点具有多种等效方式，将焊点等效为圆柱形，等效后的模型截面见图 2。就地化保护装置有限元模型采用六面体线性减缩积分单元，模型中共建立 191 322 个网格和 271 544 个节点。

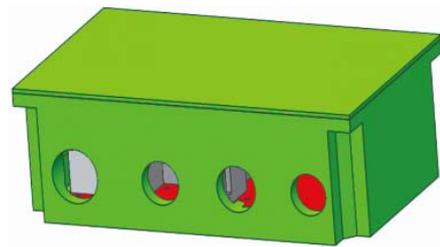


图 1 就地化保护装置的力学等效模型
Fig.1 Mechanical equivalent model of in-situ protection devices

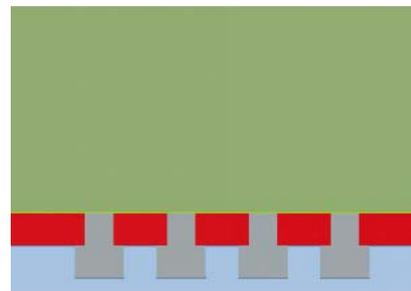


图 2 焊点力学等效模型
Fig.2 Mechanical equivalent model of solder joints

有限元模型中所用到的材料物力学性能见表 1。

表 1 材料力学性能
Tab.1 Material property table

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
箱体	2750	71	0.33
PCB	1850	15	0.28
引脚	8940	120	0.35
焊点	8420	35	0.363

2 就地化保护装置跌落冲击仿真

根据试验要求，就地化保护装置在 1 m 的高度进行自由跌落试验。根据速度载荷法，将模型等效为临近地面时以 4429 mm/s 的垂直速度与硬质地面碰撞，

跌落冲击过程历时 5 ms。文献^[14-15]的研究成果表明：PCB 板上的元器件朝下、焊点朝上，为跌落冲击的最恶劣工况。在最恶劣工况下进行装置的跌落冲击仿真分析。

2.1 PCB 板焊点失效分析

在跌落的瞬间，箱体首先与地面接触，将冲击加速度传递给 PCB 板支撑，然后传递到 PCB 板，从而引起 PCB 板不同程度的弯曲变形，进而影响焊点应力。

就地化保护装置跌落过程中 PCB 板的应力云图见图 3a，变形云图见图 3b。最大应力为 245.9 MPa，最大应力主要集中在与螺栓固定的螺栓孔周围；最大相对变形量为 3.6 mm，变形较大的位置集中在 PCB

板中间区域以及螺栓孔周围区域。PCB 板的螺钉固定位置和重量分布是造成上述现象的主要原因。互感器布置相对集中，使互感器底部 PCB 板强度相对增强，变形小于其他区域。图 4a 和 b 表示在跌落冲击过程中 PCB 板的向上挠曲变形和向下挠曲变形。由于 PCB 板和焊盘、焊点以及互感器密封胶的材料属性不同，导致在 PCB 板变形量不同，当 PCB 板向上弯曲时，两端焊点承受拉伸载荷，中间承受压缩载荷；当 PCB 板向下弯曲时，正好相反。由此可见，在装置跌落冲击过程中，焊点承受周期性的拉压交替载荷的作用，并且最外围的焊点先发生失效，因此，可以通过减振处理或合理布置 PCB 支撑点等方式，减小 PCB 板的变形量，以达到提高焊点可靠性的目的。

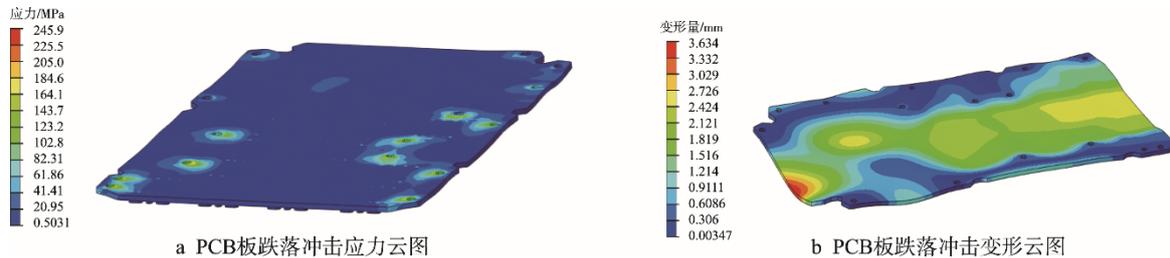


图 3 PCB 板跌落冲击的动态响应
Fig.3 Dynamic response of PCB plate to drop impact

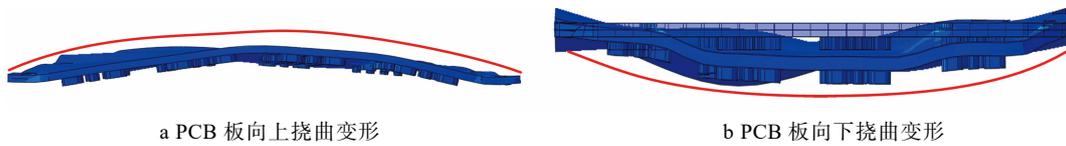


图 4 PCB 板挠曲变形云图
Fig.4 Flexural deflection cloud diagram of PCB plate

2.2 互感器封装对焊点强度的影响

重点对互感器及焊点进行建模，对比分析互感器封装方式对焊点强度的影响。封装方式分为两种：引脚直接焊接固定；引脚焊接固定+螺栓固定。

1) 在引脚直接焊接固定的情况下，互感器各焊点的应力云图见图 5a，1 ms 时刻焊点最大应力为 279.6 MPa，应力较大区域集中在图中竖线两侧，这与 PCB 板上互感器分布以及挠曲变形有关，PCB 板变形大的区域焊点应力也较大。

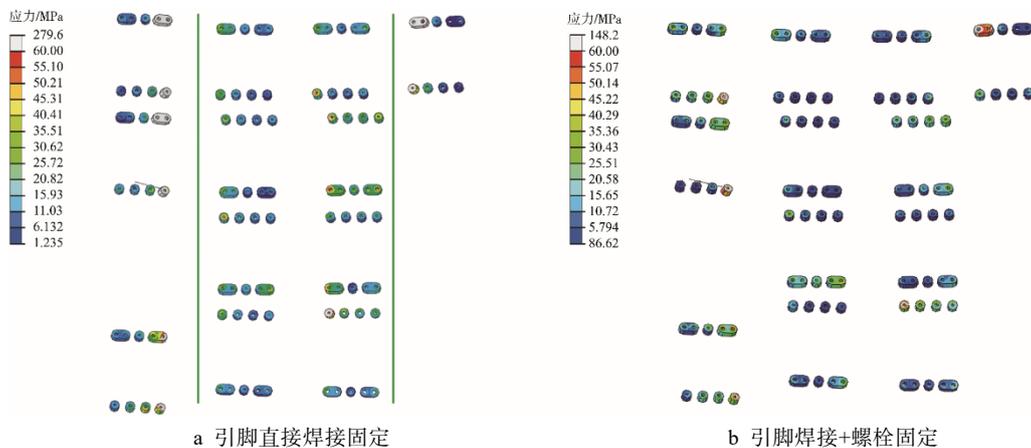


图 5 焊点的应力云图
Fig.5 Stress cloud diagram of solder joints

在引脚焊接固定+螺栓固定的情况下，互感器各焊点的应力云图见图 5b，1 ms 时刻焊点最大应力为 148.2 MPa，焊点应力较大的区域集中在单个互感器的外侧焊点处。互感器螺钉的应力云图见图 6，可见最大应力为 366.7 MPa，应力较大区域与焊点应力较大区域基本对应。在此封装方式下，焊点应力较小的原因是因螺钉的存在，焊点与螺钉组成了新的受力分布情况，相同冲击能量的条件下有更多的点承外受力，从而降低了焊点的应力。

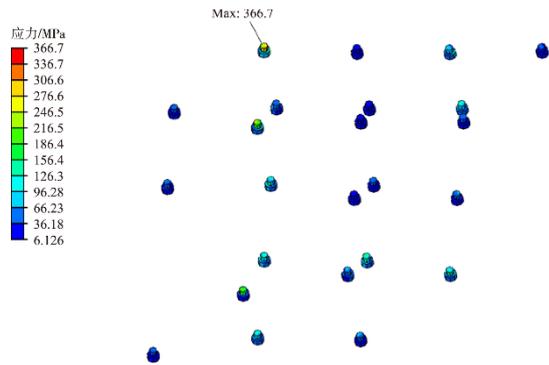


图 6 引脚焊接+螺栓固定下的螺钉应力云图
Fig.6 Stress cloud diagram of screws joints on pin welding and bolt fixing

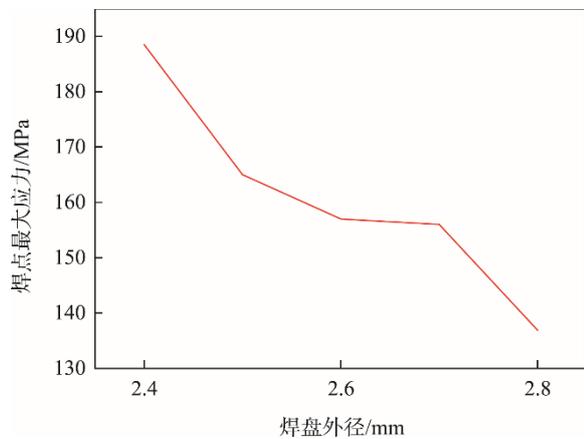


图 7 焊点最大应力随焊盘直径变化曲线
Fig.7 Maximum stress of solder joints varying with pad diameter

根据上述仿真结果得到的焊点最大应力，联合焊点跌落寿命预测模型对产品可靠性进行评估。焊点跌落冲击的寿命预测模型^[16]为：

$$N_{50} = C_1 \sigma^{C_2} \tag{6}$$

式中： N_{50} 为失效率 50%时的跌落碰撞次数； σ 为关键焊点的最大应力值； C_1 ($C_1 = 9.045 \times 10^8$)， C_2 ($C_2 = -3.1485$) 为相关系数。

以上公式计算可知，在引脚焊接固定的情况下，焊点最大应力为 279.6 MPa，焊点能够承受的跌落冲击寿命不超过 18 次；在引脚焊接固定+螺栓固定的情况下，焊点最大应力为 148.2 MPa，焊点碰撞寿命不超过 132 次。

2.3 焊盘大小与焊点最大应力的关系

焊点的失效是造成整个产品可靠性降低的主要原因，对比分析了不同焊盘大小对焊点最大应力的影响。在质量、焊点高度、材料等因素相同的情况下，针对建立的就地化保护装置力学模型，对比分析焊盘外径分别为 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 mm 时焊点的最大应力，焊点最大应力随焊点外径变化的曲线见图 7。焊点最大应力曲线表明，焊点最大应力随焊盘外径的增加而减小，这是由于焊盘外径变大，受力面积增加，焊点处的应力降低。

3 试验验证

根据试验要求，在跌落试验时需要对接地化保护装置的 6 个面、8 个角、12 条棱边分别进行一次跌落试验，这 26 次跌落试验定义为一轮跌落试验。跌落试验模型见图 8a，安装有互感器的 PCB 板装在装置内部从 1 m 高度进行自由跌落试验。

在第 1 种互感器封装方式下，第 1 轮试验结果见图 8b，部分互感器不同程度出现松动，底面较多焊盘出现松动和脱落的现象，装置内部电器件的电气性能失效。试验结果与跌落不超过 18 次仿真分析结果基本吻合，验证了仿真结果的有效性。

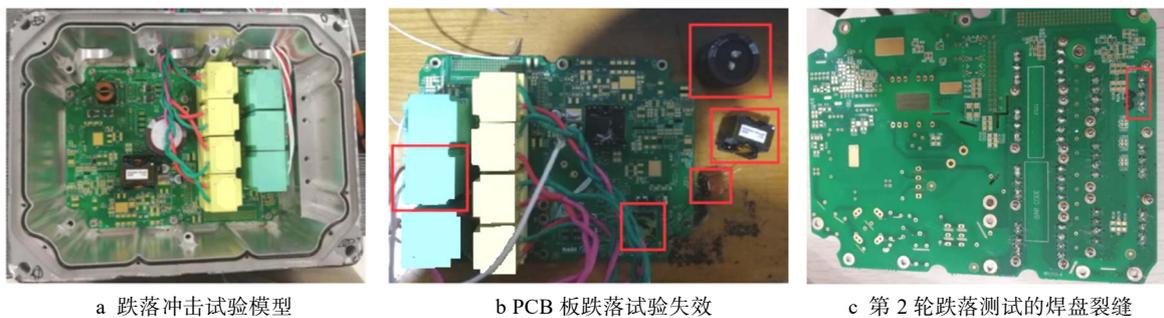


图 8 跌落试验结果
Fig.8 Result of drop test

除此之外,绕线电感、电容、变压器等元件也出现脱落的现象。该现象的主要原因是元件下方支撑不足,PCB变形量比较大,造成焊点失效。

在第2种互感器封装方式下,第1轮跌落测试结果:所有互感器外观及焊盘完好无损,并且其输出电阻和输出电压均正常。第2轮跌落测试结果:互感器及焊盘外观完好无破损,最边缘的互感器有2个输入引脚焊盘有细微裂缝(见图8c),但其输出电阻和输出电压电气性能均正常。试验结果表明,最边缘的焊点会最先失效,这与焊点失效的理论分析结果一致。

4 结语

采用有限元法对就地化保护装置进行跌落冲击仿真分析,并针对元件不同封装方式进行试验对比验证。结果表明:试验数据与仿真数据基本吻合,验证了仿真结果的准确性,为预估产品可靠性提供了依据;PCB板周期性的弯曲变形导致焊点承受拉压交变载荷的作用,是焊点失效的主要原因,PCB变形较大的区域对应焊点应力较大,设计时应合理布局PCB板支撑点,降低变形量;元件封装方式对产品可靠性有较大影响,通过最大应力和焊点寿命预测模型可以有效评估产品可靠性;在一定条件下,焊盘大小与产品可靠性成正比例关系,对于重要元件应在合理范围内增大焊盘。研究方法和结论同样适用于其他电子产品的跌落冲击可靠性分析。

参考文献:

- [1] 周华良,汪世平,宋斌,等.就地化装置硬件外特性的在线监测与诊断方法[J].电力系统自动化,2017,41(22):138—144.
ZHOU Hua-liang, WANG Shi-ping, SONG Bin, et al. On-line Monitoring and Diagnosis Method for Hard Ware External Characteristics of Localized Equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 138—144.
- [2] 王德林,郑玉平,周华良,等.基于多HSR环网的分布式母差平台及关键技术[J].电力系统自动化,2017,41(16):27—34.
WANG De-lin, ZHENG Yu-ping, ZHOU Hua-liang, et al. Platform and Key Technology for Distributed Bus Protection Based on Multi-HSR Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 27—34.
- [3] 周华良,郑玉平,姜雷,等.适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J].电力系统自动化,2014,38(23):96—100.
ZHOU Hua-liang, ZHENG Yu-ping, JIANG Lei, et al. An Equal-interval Sampling Control and Synchronization Method for Merging Unit[J]. Automation of Elec-

- tric Power Systems, 2014, 38(23): 96—100.
- [4] 吴通华,郑玉平,周华良,等.基于功能纵向集成的无防护安装就地化线路保护[J].电力系统自动化,2017,41(16):46—52.
WU Tong-hua, ZHENG Yu-ping, ZHOU Hua-liang, et al. Vertically Integrated Outdoor Installation Line Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 46—52.
- [5] 周华良,郑玉平,姚吉文,等.面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术[J].电力系统自动化,2015,39(19):96—100.
ZHOU Hua-liang, ZHENG Yu-ping, YAO Ji-wen, et al. Network Packet Control Technology for Secondary Equipments in Smart Substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96—100.
- [6] 周华良,郑玉平,姜雷,等.基于点对点通信的分布式实时控制技术[J].电力系统自动化,2015,39(10):107—111.
ZHOU Hua-liang, ZHENG Yu-ping, JIANG Lei, et al. A Distributed Real-time Control Technology Based on Point-to-point Communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 107—111.
- [7] 杨雪霞,肖革胜,树学峰.板级跌落冲击载荷下无铅焊点形状对BGA封装可靠性的影响[J].振动与冲击,2013,32(1):104—107.
YANG Xue-xia, XIAO Ge-sheng, SHU Xue-feng. Effects of Solder Joint Shapes on Reliability of BGA Packages under Board Level Drop Impact Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(1): 104—107.
- [8] TEE Tong-yan, LUAN Jing-en, PEK Eric, et al. Impact Life Prediction Modeling of TFBGA Packages under Board Level Drop Test[J]. Microelectronics Reliability, 2004, 44(7): 1131—1142.
- [9] NG Hun-shen, TEE Tong Yan, LUAN Jing-en. Design for Standard Impact Pulse of Deep Tester Using Dynamics Simulation[C]. Piscataway: Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference, 2004.
- [10] 刘芳.跌落碰撞下SMT无铅焊点可靠性理论与实验研究[D].上海:上海交通大学,2008.
Liu Fang. Reliability Theory and Experimental Study of SMT Lead-free Solder Joints under Drop Collision[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.
- [11] 王文,孟光,刘芳,等.基于比例风险模型的板级无铅焊点跌落寿命分析[J].振动与冲击,2011,30(3):124—128.
WANG Wen, MENG Guang, LIU Fang, et al. Falling Life Analysis of Lead-free Solder Joints at Plate Level Based on Proportional Risk Model[J]. Vibration and Shock, 2011, 30(3): 124—128.
- [12] 庄茁.基于ABAQUS的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.

- ZHUANG Zhuo. ABAQUS Finite Element Analysis and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [13] 刘志峰, 张敬东, 成焕波. 基于 ABAQUS 显式动力学的 PCB 板跌落研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(12): 1456—1461.
LIU Zhi-feng, ZHANG Jing-dong, CHENG Huan-bo. Study on PCB Board Drop Based on ABAQUS Explicit Dynamics[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12): 1456—1461.
- [14] 张玉祥, 马柳艺, 张有宏. 基于速度载荷法的板级电子封装跌落失效分析[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(21): 4712—4715.
ZHANG Yu-xiang, MA Liu-yi, ZHANG You-hong. Board-level Electronics Packaging Drop Failure Analysis Based on Velocity Load Method[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(21): 4712—4715.
- [15] 周新. 板级无铅焊点跌落冲击载荷下可靠性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
ZHOU Xin. Board Level Lead-Free Solder Joints Reliability Analysis under Drop Shock Loading[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [16] WEN L, FU X M, ZHOU J W, et al. Dynamic Properties Testing of Solders and Modeling of Electronic Packages Subjected to Drop Impact[C]// International Conference on Electronic Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, Euro Sim E, 2005: 559—565.