

基于随机振动过程应力分析的 BGA 焊点结构优化

杨雪霞¹, 孙勤润¹, 王超¹, 彭银飞¹, 张伟伟²

(1. 太原科技大学应用科学学院, 山西太原 030024; 2. 东莞理工学院机械工程学院, 广东东莞 523000)

摘要: 建立了板级 BGA (Ball Grid Array) 焊点有限元分析模型, 选取芯片高度、焊点直径、焊点高度、焊点间距作为设计变量, 以焊点应力作为响应目标, 分别采用田口正交及曲面响应法设计了 25 组不同水平组合的焊点模型并进行仿真计算, 通过数理统计分析及回归分析对焊点结构参数进行了优化, 获得了焊点应力最小结构参数最优水平组合. 结果表明: 在相同条件下, 曲面响应优化的结果优于田口正交的结果; 应力最小的焊点水平组合为焊点直径 0.32 mm, 焊点高度 0.20 mm, 焊点间距 0.36 mm; 最优水平组合等效应力值为 0.3915 MPa, 降低了 0.65 MPa, 实现了 BGA 焊点结构参数的优化.

关键词: BGA 焊点; 田口正交; 曲面响应; 有限元

基金项目: 国家自然科学基金 (No.11602157); 山西省自然科学基金面上项目 (No.20210302123220); 广东省普通高校机器人与智能装备重点实验室资助项目 (No.2017KSYS009); 东莞理工学院机器人与智能装备创新中心资助项目 (No.KCYCXPT2017006)

中图分类号: TN4; TG404

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)10-2783-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220390

Optimization of BGA Solder Joint Structure Based on Stress Analysis of Random Vibration

YANG Xue-xia¹, SUN Qin-run¹, WANG Chao¹, PENG Yin-fei¹, ZHANG Wei-wei²

(1. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 020024, China;

2. Dongguan Institute of Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong 523000, China)

Abstract: A board-level BGA (Ball Grid Array) solder joint finite element model is established. The chip height, solder joint diameter, solder joint height, and solder joint spacing are selected as design variables, and the critical solder joint stress is used as the response target. We design 25 groups of solder joint models simulating and calculating based on the Taguchi orthogonal and the surface response method. The structural parameters of the solder joints are optimized through mathematical statistical and regression analysis. And the optimal solder structural combination with the minimum joint stress is obtained. The results show that the result of surface response optimization is better than the Taguchi orthogonal under the same conditions. And the best combination of solder joints is solder joint diameter 0.32 mm, solder joint height 0.20 mm, solder joint spacing 0.36 mm. The equivalent stress value of the best combination is 0.391 5 MPa, which is reduced by 0.65 MPa. They show that the optimization of the structural parameters of BGA solder joints is achieved.

Key words: BGA solder joint; taguchi orthogonal; surface response; finite element

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.11602157); Shanxi Provincial Natural Science Foundation (No.20210302123220); Supported Project by the Key Laboratory of Robotics and Intelligent Equipment in Guangdong Province's Ordinary Universities (No.2017KSYS009); Supported by the Robot and Intelligent Equipment Innovation Center of Dongguan Institute of Technology (No.KCYCXPT2017006)

1 前言

电子封装作为国家未来发展战略产业集成电路的关键部分, 因高可靠性成为研究热点. 球栅阵列封装

(Ball Grid Array, BGA) 因适用广、良品率高、电性能及散热性能好等优势成为主流封装技术^[1]. BGA 封装器件焊点具有电气互联、机械支撑与散热作用, 但其却是

电脑、手机、iPad、车规级芯片等产品在运输和负载过程中易发生振动变形,承受较高机械应力而破坏的位置^[2,3].

因此,对器件焊点在随机振动过程应力情况难以测量,不方便显明快速找到薄弱位置^[4],有效降低焊点应力并确保焊点服役可靠性的方法研究应给予足够重视^[5].近年来,许多研究学者借助有限元仿真及优化方法来进行分析.Samavatian等人^[6]通过有限元仿真将器件应力分布及危险位置清楚呈现.Sun等人^[7]结合有限元及田口正交优化研究了小间距焊点几何结构对应力的影响,发现较高焊球能提升焊点热可靠性.王建培等人^[8]结合有限元及曲面优化研究了微尺度BGA焊点形态对焊点应力应变的影响,显著降低了焊点所承受应力值.

众多学者研究表明,焊点几何结构对焊点应力值影响显著,但同种载荷下运用有限元仿真联合田口正交及曲面响应分析两种优化方法的优劣,在一定范围内响应目标与因素间数量的关系仍需研究.因此,本文研究了BGA焊点在随机振动下的可靠性,运用有限元得到焊点应力分布,通过田口正交及曲面响应两种优化方法研究焊点结构对等效应力的影响,并建立了显著因子与等效应力间的非线性预测关系,为优化提高焊点可靠性提供了一定参考.

2 BGA焊点可靠性有限元模拟

2.1 三维有限元模型及载荷施加

本文选仙童半导体公司的FAN48632UC33X FBGA产品作为分析对象,为避免对称模型丢失模态而建立板级BGA整体模型,3D BGA封装样式见图1.模型组成PCB板、SAC305焊点、Si芯片三部分,具体尺寸:PCB板 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$,焊点径向 0.25 mm ,焊点高度 0.24 mm ,焊点间距 0.4 mm ,焊点阵列 5×5 ,Si芯片 $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,各FBGA封装之间横纵向距离为 5 mm .以上部分材料属性见表1.BGA焊点用Multizone尺寸分区控制方法划分,其他部分用四面体网格自由划分,网格数据统计质量 $0.859\ 33$,单元数量 $340\ 916$,节点数 $863\ 546$.

板级BGA封装采用基于美军标MIL-ATDNV MAT P9492的PSD加速度功率谱曲线,见图2.随机振动频率在 $20\sim 80\text{ Hz}$ 时,其振动量值为 $+3\text{ dB/oct}$;随机振动频率在 $80\sim 350\text{ Hz}$ 时,加速度功率谱密度水平幅值为 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$;随机振动频率在 $350\sim 2\ 000\text{ Hz}$ 时,其振动量值为 -3 dB/oct ,其方向为沿螺栓孔面垂直于PCB板的Z轴.

2.2 随机振动结果分析

运用ANSYS软件进行BGA焊点的随机振动有限

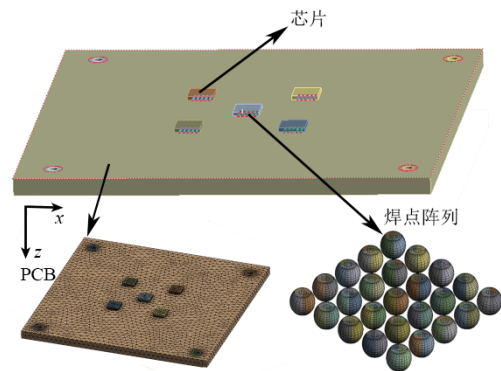


图1 3D BGA封装样式

表1 FBGA模型材料属性及尺寸

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
Si芯片	131	0.30	2 320
SAC305	38	0.35	7 300
PCB板	18.2	0.25	1 200

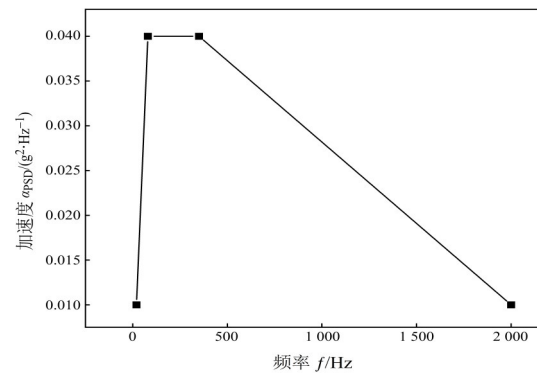


图2 PSD功率谱密度

元分析,建好仿真模型,施加相应材料参数后,首先对模型进行了模态分析,边界条件为在PCB板底面4个角点施加固定约束,然后再进行了PSD谱分析,得到3D的BGA全结构焊点等效应力云图分布情况,见图3.焊点等效应力值呈现四角处的焊点较高,位于中心部位的焊点等效应力较低,并且值由中心向边缘焊点逐渐增加的情况.最大等效应力位于距离芯片封装中

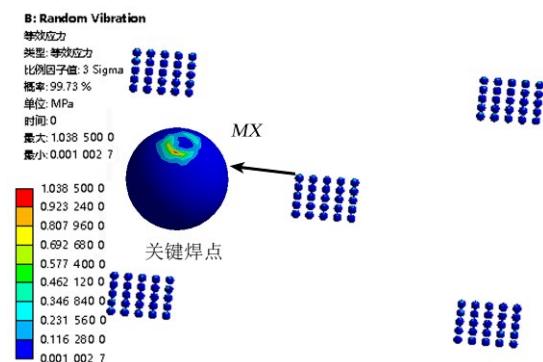


图3 全结构焊点等效应力分布

心最远的焊点靠近PCB板界面处,值为1.038 5 MPa. 因此定该角焊点为随机振动载荷下的关键焊点,随机振动所致焊点变形使四角位置比中心位置大,然后因疲劳而产生的裂纹率先在该焊点处产生,最终导致整个BGA器件失效,这与学者韩立帅^[9]研究的结果相一致.

3 田口正交BGA焊点结构参数优化

3.1 田口试验方案设计

作为一种革命性可靠性优化方法,正交试验法具有简单均匀性、准确可靠性的特点^[10]. 本节选取板级BAG封装的芯片高度、焊点直径、焊点高度、焊点间距四个结构参数,并且每因素取五水平,其因素水平表见表2. 依据田口正交表得到25组参数水平组合,将等效应力作为评价焊点可靠性的优化指标,并进行了相应模拟,详见表3.

3.2 数理优化分析

利用正交表进行合理的试验计划后,将损失函数推出的信噪比定量引入优化进程,判断各因素对目标函数影响程度^[11]. 其原指播音设备功放,描述为

$$D_{S/N} = -10 \lg \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right\} \quad (1)$$

其中, $D_{S/N}$ (Signal/Noise)指信号与噪声的比值,该值越大性能越好; y_i 指质量目标等效应力.

有限元模拟得到焊点应力值和信噪比值在表3中体现,将信噪比均值效应直观显现,见图4.

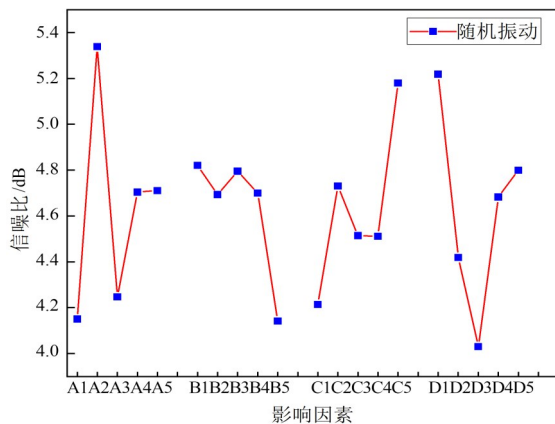


图4 信噪比均值效应

在表3中, K_i 指的是焊点几何结构该因素在1水平条件下,等效应力所对应信噪比的累加和,其他类似. 极差 R 指的是 K_1, K_2, K_3 中两极值差,数值越大表示对优化目标越有影响. 进行了极差分析之后,发现板级FBGA焊点随机振动可靠性影响先后排名:芯片高度(因素A)>焊点间距(因素D)>焊点高度(因素C)>焊点直径(因素B). 经表3和图4得到优化参数组合为

表2 控制因素及水平因子

因素名称	芯片高度/mm	焊点直径/mm	焊点高度/mm	焊点间距/mm
	A	B	C	D
水平1	0.390	0.28	0.190	0.36
水平2	0.395	0.29	0.195	0.37
水平3	0.400	0.30	0.200	0.38
水平4	0.405	0.31	0.205	0.39
水平5	0.410	0.32	0.210	0.40

表3 正交实验方案及信噪比响应

试验	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	σ /MPa	信噪比 $D_{S/N}$ /dB
1	1	1	1	1	0.644 4	3.816 9
2	1	2	2	2	0.616 1	4.206 9
3	1	3	3	3	0.625 6	4.074 1
4	1	4	4	4	0.617 8	4.183 1
5	1	5	5	5	0.597 7	4.470 3
6	2	1	2	3	0.568 7	4.902 3
7	2	2	3	4	0.570 4	4.876 4
8	2	3	4	5	0.521 4	5.656 5
9	2	4	5	1	0.462 3	6.701 5
10	2	5	1	2	0.591 9	4.555 1
11	3	1	3	5	0.595 4	4.503 8
12	3	2	4	1	0.565 2	4.955 9
13	3	3	5	2	0.625 7	4.072 7
14	3	4	1	3	0.657 8	3.638 1
15	3	5	2	4	0.626 3	4.064 4
16	4	1	4	2	0.565 5	4.951 3
17	4	2	5	3	0.580 2	4.728 4
18	4	3	1	4	0.605 1	4.363 5
19	4	4	2	5	0.584 2	4.668 8
20	4	5	3	1	0.574 9	4.808 2
21	5	1	5	4	0.505 4	5.927 3
22	5	2	1	5	0.582 2	4.698 6
23	5	3	2	1	0.512 3	5.809 5
24	5	4	3	2	0.608 9	4.309 1
25	5	5	4	3	0.723 6	2.810 1
均值						4.630 1

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	R
	4.150 3	4.820 3	4.214 4	5.218 4		
	5.338 4	4.693 2	4.730 4	4.419 1		
	4.246 9	4.795 3	4.514 3	4.030 6		
	4.704 1	4.700 1	4.511 4	4.682 9		
	4.710 9	4.141 6	5.180 1	4.799 6		
	1.188 1	0.678 7	0.965 7	1.187 8		

因素主次:A>D>C>B
优化设计:A2B1C5D1

A2B1C5D1,即芯片高度0.395 mm,焊点直径0.28 mm,焊点高度0.21 mm,焊点间距0.36 mm.

由极差分析选出优化组合以及重要因素的排序

后,对于各结构因素对FBGA焊点的等效应力所产生的影响是否显著,我们进行方差分析研究,由此更加具有针对性地控制显著性因素,以便FBGA焊点的等效应力降低,具体见表4.

表4 因素显著性水平

因素	A	B	C	D
偏差平方和/mm	0.019	0.007	0.011	0.018
自由度/mm	4	4	4	4
F比/m	9.5	3.5	5.5	9.0
贡献率/%	34.55	12.73	19.99	32.73
显著性	显著	不显著	不显著	显著

表4中,在置信水平为95%时,这时对应的临界值 $F_{0.05}$ 为6.39,因此当显著性水平 $\alpha=0.05$,有芯片高度和焊点间距的F比值均大于6.39,则其对等效应力显著,此结果与极差分析相互印证.可以根据显著性结果有针对性地为FBGA焊点相关结构参数设计提供依据,更有效地设计出可靠性最好的产品.

由于随机振动作用下因素A和D的占比达67.82%,因此接下来研究了显著性因素间交互作用对信噪比的影响,详见图5.由图看出,芯片高度为0.395mm时的总信噪比水平最高,在焊点间距0.39mm不变时,信噪比随芯片高度增加而增大.

基于以上极差和方差分析得到的板级FBGA焊点随机振动结构优化结果:A2B1C5D1(芯片高度0.395mm,焊点直径0.28mm,焊点高度0.21mm,焊点间距0.36mm),通过有限元验证分析其是否达到优化目的,详见图6.由图6可知,等效应力值降低到了0.4201MPa,较原始设计1.0385MPa降低了59.55%,优化结果均比表3中任一组都要低,实现了优化目标.

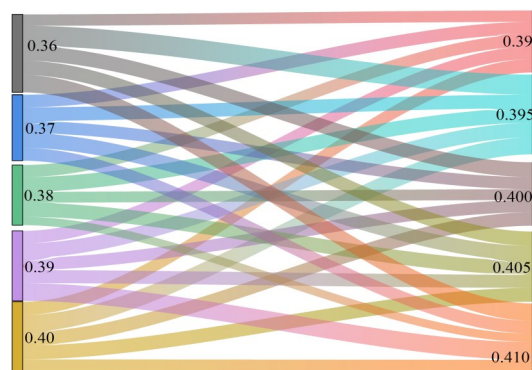


图5 BGA芯片高度、焊点间距因素交互

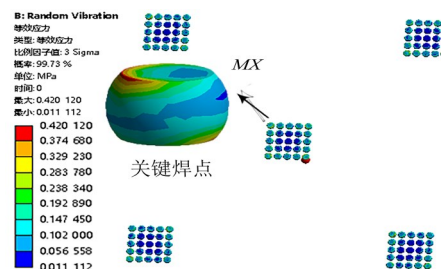


图6 优化组合焊点等效应力云图

4 曲面响应BGA焊点结构参数优化

4.1 曲面响应试验设计方案

为寻找更好优化方案,本文还选用了Box和Wilson

提出曲面响应法的Box-Behnken法,即BBD试验方案,可减少试验次数.其响应面优化详细步骤见图7.

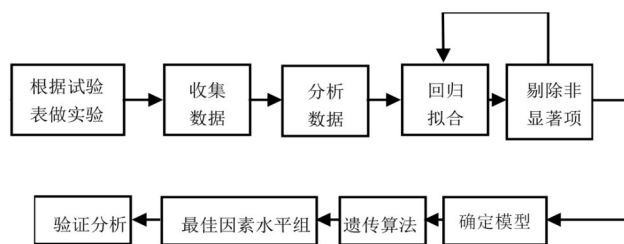


图7 曲面响应优化流程图

与田口各因素的研究范围一致,本节仍选取芯片高度、焊点直径、焊点高度、焊点直径四个因素,表2中各因素的水平1,3,5.根据BBD设计方案得到的25组试验模型及焊点等效应力结果见表5.

4.2 回归拟合分析

基于表5进行数据分析并二次多元回归拟合后,将芯片高度(x_1)、焊点直径(x_2)、焊点高度(x_3)、焊点间距(x_4)定义为拟合回归方程的4个自变量,将板级FBGA

最大等效应力值(y)作为因变量,得初次回归方程如下:

$$y = 20.7 - 16.9x_1 - 49.4x_2 - 80.1x_3 - 8.3x_4 + 35.3x_1^2 + 58.9x_2^2 + 225.7x_3^2 + 35.6x_4^2 + 4.3x_1x_2 - 9.5x_1x_3 - 28.7x_1x_4 + 23.5x_2x_3 + 13.2x_2x_4 - 38x_3x_4 \quad (2)$$

表5 BBD试验方案及等效应力结果

试验	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	σ /MPa
1	3	3	3	3	0.471 9
2	1	1	3	3	0.576 1
3	5	1	3	3	0.552 1
4	1	5	3	3	0.460 6
5	5	5	3	3	0.443 5
6	3	3	1	1	0.420 7
7	3	3	5	1	0.452 2
8	3	3	1	5	0.577 5
9	3	3	5	5	0.578 5
10	1	3	3	1	0.412 6
11	5	3	3	1	0.427 2
12	1	3	3	5	0.586 1
13	5	3	3	5	0.554 8
14	3	1	1	3	0.591 6
15	3	5	1	3	0.471 9
16	3	1	5	3	0.544 6
17	3	5	5	3	0.443 6
18	1	3	1	3	0.527 9
19	5	3	1	3	0.544 5
20	1	3	5	3	0.489 6
21	5	3	5	3	0.498 6
22	3	1	3	1	0.496 8
23	3	5	3	1	0.399 5
24	3	1	3	5	0.630 8
25	3	5	3	5	0.546 4

另外,可以通过方差分析来确定回归方程的因素显著性验证及拟合程度的好坏,方差显著性分析见表6,回归方程拟合程度具体指标见表7.

表6 筛选前方差显著性分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F值	P值
模型	4	0.103 93	0.007 42	25.67	0.000 67
芯片高度	1	0.000 09	0.000 09	0.30	0.596 25
焊点直径	1	0.033 60	0.033 60	116.17	0.000 35
焊点高度	1	0.001 35	0.001 35	4.65	0.000 52
焊点间距	1	0.063 58	0.063 58	219.83	0.000 21

当P值小于0.05时,是较强的判定结果说明因子显著,则拒绝原先假设各因子的影响.由上表可知模型显著,但芯片高度的P值为0.596 25(>0.000 1)并不显著,这与田口正交的分析不一致,其原因主要与其缺乏数

表7 筛选前回归方程分析

FitStatistics(统计数据)	值
R-Square(回归方程系数)	96.77%
Adj. R-Square(回归方程调整系数)	93.00%
Pre. R-Square(回归方程预测系数)	81.39%
FitStatus(拟合情况)	Succeeded

学模型,从而仅用方差贡献率代替了上述分析中的P值有关.初次回归方程系数R-Square、调整系数Adj R-Square和预测系数Pre. R-Square(0.967 7, 0.930 0, 0.813 9)较高,有较好拟合度但并不足够好.

因此对其剔除不显著因子及交互项因子后,进行二次回归方程拟合,以期望达到更好的拟合程度,从而更准确地预测其目标行为.更新后,再次得到回归方程如下:

$$y = 14.94 - 30.9x_2 - 72.5x_3 - 14.5x_4 + 47.1x_2^2 + 178.6x_3^2 + 23.9x_4^2 \quad (3)$$

筛选后方差显著性分析见表8,筛选后的回归方程拟合程度具体指标见表9.

表8 筛选后方差显著性分析

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F值	P值
模型	3	0.101 799	0.016 966	60.56	0.000 2
焊点直径	1	0.033 602	0.033 602	119.93	0.000 7
焊点高度	1	0.001 345	0.001 345	4.80	0.000 4
焊点间距	1	0.063 583	0.063 583	226.93	0.000 3

表9 筛选后回归方程分析

FitStatistics(统计数据)	值
R-Square(回归方程系数)	98.78%
Adj. R-Square(回归方程调整系数)	93.22%
Pre. R-Square(回归方程预测系数)	90.21%
FitStatus(拟合情况)	Succeeded

表8可知,因子的P值均小于0.05,说明此时因子均显著,且回归方程系数R-Square、调整系数Adj R-Square和预测系数Pre. R-Square(0.987 8, 0.932 2, 0.902 1)均比之前高.做方差分析之前先假设了各因子对等效应力的优化目标有影响的概率很低,即样本事件的发生概率小,由P值<0.05可知,我们拒绝了原假设(响应目标与各因子无关),且样本发生的概率及显著性水平很高.为此绘制了在置信水平95%, $\alpha=0.05$ 下,确定因子显著水平的标准化效应Pareto图和正态图,分别见图8、图9.

标准化效应的Pareto图可确定效应的量值和重要性.在图8中可以看出在标准化效应超过2.09时,因子项在 $\alpha=0.05$ 下是显著的.但Pareto图显示的是效应的绝对值,无法确定增大或者减小等效应力响应的因子,因此进一步可用标准化正态图确定.

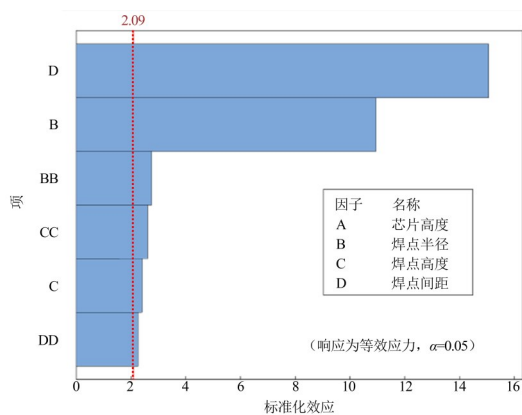


图8 标准化效应 Pareto 图

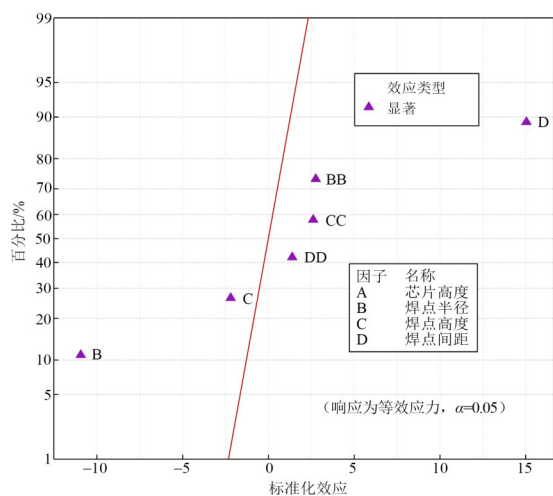


图9 标准化效应正态图

标准化效应正态图可确定效应的量值、方向和重要性。图9中可看出,离0较远的因子效应在统计意义上显著,且影响权重焊点间距>焊点高度>焊点直径,这与田口正交极差分析结果一致;因子焊点直径和焊点高度对等效应力是负效应,因子焊点间距对应力响应是正效应。

为了进一步确定筛选后的函数拟合值与观测值的差值及异常情况,我们也进行了标准化残差的计算,见图10。标准化残差通过将不同方差转换为通用简单的尺度来解决问题,大于2和小于-2的标准化残差通常被视为异常观测值。通过正态概率图、拟合值、直方图、顺序关系的描述可以看出,所选择的实验点大都落在标准化残差-2至2间,这说明筛选后拟合的二次回归方程与试验结果较为贴切,达到了拟合预测的要求,能够做出比较正确且规范的预测。

综上所述,本节根据曲面响应试验设计流程的实验结果进行了响应目标与焊点结构参数之间的二次回归拟合,并剔除了非显著性因素后,将筛选前后的拟合二次回归方程对比,并对筛选后拟合的二次回归方程

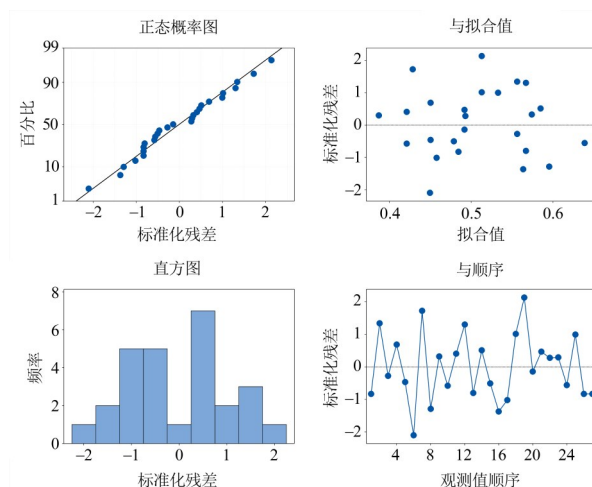


图10 拟合函数诊断标准化残差图

标准化效应图以及标准化残差图的绘制分析,这增加了拟合回归方程的准确性,以及预测结果的可靠性,便于为后续的优化算法奠定数据基础。

4.3 遗传算法优化

遗传算法(Genetic Algorithm)是1975年由Holland教授提出的一种群搜索技术及生物进化思想结合的搜索进化方法^[12]。将得到的筛选后二次多项式回归方程中等效力最低的参数作为优化目标,进行焊点几何结构参数优化,根据响应表设置的约束条件如下: $0.28 \leq x_2 \leq 0.32$, $0.19 \leq x_3 \leq 0.21$, $0.36 \leq x_4 \leq 0.40$ (x_2 为焊点直径, x_3 为焊点高度, x_4 为焊点间距),个体变量数为3,种群个体数50,变异0.1,代沟0.9,迭代次数为143次,迭代143次后适应度函数种群最优解及均值变化见图11。

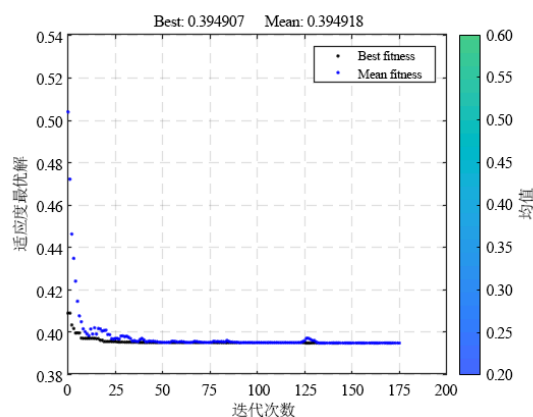


图11 适应度函数种群最优解及均值变化

由上可知新种群适应度函数经过迭代逐渐收敛,当结果保持稳定时停止计算并将最优解个体组合进行输出,有 $x_2=0.32$, $x_3=0.20$, $x_4=0.36$, $y=0.3949$,适应度值比表5中的应力最小值0.3995少了 5×10^{-3} MPa。

但其预测得是否准确仍需进行仿真验证,在其他

条件一致时,将焊点直径 0.32 mm,焊点高度 0.20 mm,焊点间距 0.36 mm 重新建模,进行随机振动过程的有限元分析后,得到的焊点阵列等效应力分布图见图 12。可知,板级 FBGA 焊点随机振动过程中焊点最大等效应力值为 0.391 5 MPa,与遗传算法优化的预测值 0.394 9 MPa 相比,预测误差比例仅为 0.946%;与 25 组曲面响应的试验设计组合最低等效应力 0.399 5 MPa 相比,减小了 2.35%。由此验证了该优化组合的准确性及预测板级 FBGA 最优几何结构参数水平组合的有效性。

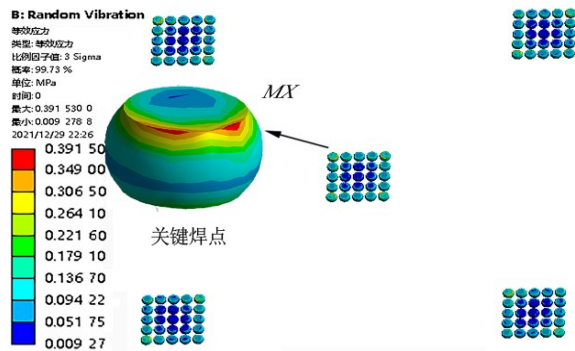


图 12 最优水平组合板级 FBGA 焊点等效应力图

综上,曲面响应优化方案验证结果 0.391 5 MPa 比田口正交优化方案验证结果 0.420 1 MPa 要好,说明曲面响应优化方案在得到数学模型等一系列数理统计分析筛选的缜密流程,加上遗传算法的迭代优化,一定程度上提高了“最优解”的精度,从而具有一定实用价值。

5 结论

本文通过建立三维 BGA 焊点仿真模型对 BGA 焊点随机振动加载下的等效应力分析,并结合田口正交及曲面响应两种优化方法,对无铅焊点 SAC305 进行了可靠性分析及焊点结构优化后,得出以下结论:

(1) 随机振动条件下,板级 BGA 关键焊点位于中间封装的边角焊点处。

(2) 田口正交优化组合为 A2B1C5D1 (芯片高度 0.395 mm,焊点直径 0.28 mm,焊点高度 0.21 mm,焊点间距 0.36 mm) 等效应力值降低到了 0.420 1 MPa,较原始设计 1.038 5 MPa 降低了 59.55%,实现了优化目的。

(3) 曲面响应优化组合为焊点直径 0.32 mm,焊点高度 0.20 mm,焊点间距 0.36 mm,等效应力值为 0.391 5 MPa,仿真证实同等运行条件下该结果要比田口正交优化结果好,且也实现了焊点结构参数的优化。

参考文献

[1] 赵胜军,黄春跃,梁颖,等. BGA 无铅焊点再流焊焊后残余应力分析与优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10):

86-94.

ZHAO S J, HUANG C Y, LIANG Y, et al. Analysis and optimization of residual stress after reflow soldering of BGA lead free solder joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 86-94. (in Chinese)

[2] 温桂琛,雷永平,林健,等. BGA 无铅焊点在跌落冲击载荷下的失效模式与机理[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 73-76, 132.

WEN G C, LEI Y P, LIN J, et al. Failure mode and mechanism of BGA lead-free solder joints under drop-impact load[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 73-76, 132. (in Chinese)

[3] 陈志文,梅云辉,刘胜,等. 电子封装可靠性: 过去、现在及未来[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 248-268.

CHEN Z W, MEI Y H, LIU S, et al. Reliability in electronic packaging: Past, now and future[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 248-268. (in Chinese)

[4] 撒子成,王尚,冯佳运,等. SiP 器件组装焊点形态预测及其随机振动可靠性仿真研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(2): 276-283.

SA Z C, WANG S, FENG J Y, et al. Simulation of SiP solder joint geometry and random vibration reliability prediction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(2): 276-283. (in Chinese)

[5] 黄春跃,赵胜军,梁颖,等. CSP 焊点焊后残余应力分析与预测[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(1): 148-154.

HUANG C Y, ZHAO S J, LIANG Y, et al. Analysis and prediction of residual stress after reflow soldering of CSP solder joints[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(1): 148-154. (in Chinese)

[6] SAMAVATIAN M, ILYASHENKO L K, SURENDAR A, et al. Effects of system design on fatigue life of solder joints in BGA packages under vibration at random frequencies[J]. Journal of Electronic Materials, 2018, 47(11): 6781-6790.

[7] SUN H Y, BO G, ZHAO J C. Thermal-mechanical reliability analysis of WLP with fine-pitch copper post bumps[J]. Soldering & Surface Mount Technology, 2021, 33(3): 178.

[8] 王建培,黄春跃,梁颖,等. 基于回归分析和遗传算法的 BGA 焊点功率载荷热应力分析与优化[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 734-740.

WANG J P, HUANG C Y, LIANG Y, et al. Thermal stress analysis and optimization of BGA solder joint power load based on regression analysis and genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3): 734-740. (in Chinese)

- [9] 韩立帅, 黄春跃, 梁颖, 等. 3D 封装微尺度 CSP 焊点随机振动应力应变分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 64-70, 164. HAN L S, HUANG C Y, LIANG Y, et al. Analysis of stress strain and shape size optimization of 3D micro-scale CSP solder joints in random vibration[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 64-70, 164. (in Chinese)
- [10] CHO M, KIM S, JOUN M S. Optimal process design of an optimal, single-stage, symmetrical L-bending process employing taguchi method with finite element method, and experimental verification thereof[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2022, 23(4): 395-404.
- [11] GHARAIBEH M A, PITARRESI J M. Random vibration fatigue life analysis of electronic packages by analytical solutions and Taguchi method[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 102: 113475.
- [12] WANG D H, SUN W, GAO Z H, et al. Vibration response analysis and hoop layout optimization of spatial pipeline under random excitation[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2022, 94(8): 1242-1251.

作者简介



杨雪霞 女, 1985 年出生, 河北邯郸人. 博士. 太原科技大学应用科学学院副教授. 山西省“三晋英才”优秀青年人才. 近年来主持国家自然科学基金青年项目、山西省自然科学基金面上项目和青年项目等多个项目. 主要研究方向为合金材料弹塑性力学性能、集成电路微电子封装可靠性.

E-mail: yangxuexia0124@126.com



孙勤 男, 1996 年出生, 山东淄博人. 太原科技大学应用科学学院力学硕士研究生. 主要研究方向为集成电路微电子封装力学可靠性与数值优化研究.