

# 叠层CSP封装的振动模糊可靠性分析

刘孝保, 杜平安, 李磊

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**由于叠层CSP封装的复杂性,其振动特性很难用精确的理论模型表示。同时,由于传统的共振准则没有考虑到系统的变异性及模糊性,导致分析结果与真值具有较大偏差。该文利用有限元法方法建立叠层CSP封装振动分析模型,并求解其振动特性;在此基础上充分考虑系统的模糊性,对振动可靠性模型进行模糊处理,利用模糊理论建立其振动模糊可靠性理论模型。通过算例验证了振动模糊可靠性理论模型的有效性和可行性。

**关键词** CSP封装; 有限元方法; 模糊可靠性; 共振  
**中图分类号** TU311.2 **文献标识码** A

## Fuzzy Reliability Analysis of Vibration in CSP Package

LIU Xiao-bao, DU Ping-an, and LI Lei

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The vibratory characteristic of the chip size package (CSP) is difficult to be abstracted to an accurate academic model because of its complexity, and because the classic resonance rules can not take the fuzziness of resonant region into account, the results of vibration reliability analysis are inaccurate for actual demands possibly. finite element method (FEM) is used to build up the vibration analysis model and analyze. Furthermore, base on the analysis of FEM, an academic fuzzy reliability analysis model of vibration is built up with the help of fuzzy theory. In the end, a calculating example of fuzzy reliability analysis of vibration testifies the proposed method and principle are effective.

**Key words** CSP package; finite element method; fuzzy reliability; resonance

随着电子技术的快速发展,电子封装成为整个微电子产业的一个瓶颈。从某种意义上讲,电子产业的竞争主要体现在电子封装上<sup>[1]</sup>。由于电子产品多应用于复杂的工作环境中,总会受到一些不确定的振动激励,即总是工作在随机振动干扰的环境中。当环境的振动干扰接近系统的固有频率时,会因发生共振而可能引起系统的失效。因此,进行电子封装的振动可靠性分析就成为设计的一项重要任务。

传统的共振准则把激振频率 $f=(0.9\sim 1.1)\omega$ ( $\omega$ 为系统固有频率)作为共振区,当激振频率 $f$ 位于该范围内时认为发生共振,否则不引起共振。然而事实上并没有考虑到结构系统内部以及外部环境的随机性和变异性<sup>[2]</sup>。当系统随机性和变异性较大以及对结果精度要求较高时,该方法获得的结论并不一定能满足实际需求。为了使分析结果满足实际需求,需将共振区和非共振区的边界进行模糊化处理,利用模糊理论来分析其可靠性。

芯片尺寸封装(chip size package 或 chip scale

package, CSP)是目前最先进的集成电路封装形式之一,也是电子封装的发展方向之一,但其相关技术还有待完善。对于CSP封装,其安全性要求较高,且结构相对较复杂,要想获得一个精确的理论模型很困难。本文借助有限元法分析CSP的振动特性,并在此基础上结合模糊理论研究其振动模糊可靠性。

### 1 有限元建模

叠层CSP封装就是在芯片封装尺寸满足CSP定义时,在原来单芯片封装的基础上,将多块通用裸芯片叠层,并置于同一封装内<sup>[3]</sup>。本文所涉及的模型为采用引线键合工艺的金字塔型叠层CSP封装芯片,其结构如图1所示。

对于振动可靠性,首先进行模态分析。由于叠层CSP封装的复杂性,很难用精确的理论模型来描述其模态,需利用有限元法等数值分析方法。

针对叠层CSP封装的特点,其振动有限元模型如图2所示。



图1 金字塔叠层CSP封装形式

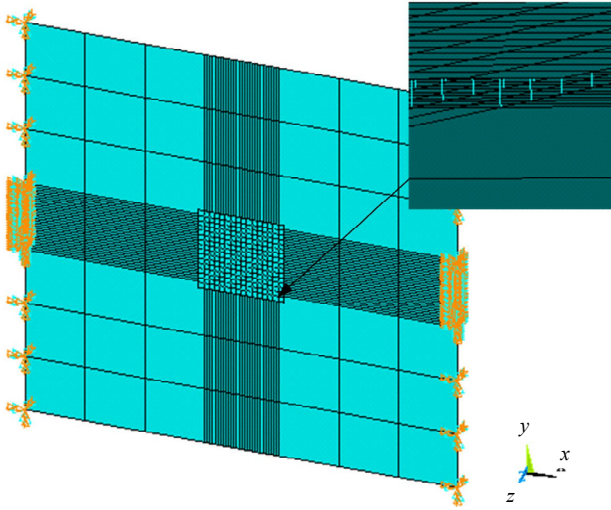


图2 CSP封装有限元模型

在建模时进行了如下的简化:

(1) 不采用全三维的建模方式,特别是对于数量较多的焊点部分,主要考虑模型的复杂性,减少计算量。

(2) 利用等效梁单元来代替三维局部焊点模型。文献[4-7]通过比较将芯片以质量点、弹簧单元和梁单元等建模方法时发现,用等效参数的梁单元来代替三维局部焊点模型能与实验取得较吻合的结果。根据梁单元的等效原理,在ANSYS中选择梁单元BEAM188,定为圆形截面,高度与焊点等高,其等效梁单元半径和等效弹性模量按照等效原理获得。

(3) PCB板用统一模型来简化,忽略表面阻焊层和布线层。

(4) 考虑到封装体体积、质量与PCB板相比都较小,内部芯片、粘接层材料等的刚度对整个系统刚度影响不大,故将封装看作一个整体,用壳单元或实体单元来建模。

## 2 模糊可靠性分析

### 2.1 隶属函数的确定

对于模糊问题求解的主要方法就是要找到其隶属函数来表征其模糊特性。根据模糊理论,隶属函数通常有偏大型隶属函数、偏小型隶属函数和中间型隶属函数三种类型,分别用来表示偏大一方的模糊现象、偏小一方的模糊现象和中间型模糊现象。由于共振属于中间型模糊现象,因此本文采用中间型隶属函数。

常见的中间型隶属函数有正态型、梯形、三角型和中间柯西型,通常采用正态型<sup>[8]</sup>。该隶属函数具有如下特点<sup>[2]</sup>: (1) 共振区与非共振区相互渗透。(2) 共振区中间的隶属度为1。(3) 共振区与非共振区的交点处模糊性最大,其隶属度为0.5。满足以上特点的隶属函数为:

$$u(z_{ij}) = e^{-\left(\frac{z_{ij}}{0.144 \cdot 27 \bar{\omega}_i}\right)^2} \quad (1)$$

式中  $z_{ij} = f_j - \omega_i$ ;  $\omega_i$  为结构的第*i*阶固有频率;  $\bar{\omega}_i$  为  $\omega_i$  的平均值;  $f_j$  为第*j*个激振频率。

为了更灵活准确地表征振动失效的程度,本文利用阈值  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 表示其失效水平,认为隶属度低于阈值时将不构成共振失效。为了表述的简便,当  $\alpha \neq 0$  时,令:

$$\beta = 0.144 \cdot 27 \bar{\omega}_i \sqrt{-\ln \alpha} \quad (2)$$

因此隶属函数为:

$$u(z_{ij}) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{z_{ij}}{0.144 \cdot 27 \bar{\omega}_i}\right)^2} & -\beta \leq z_{ij} \leq \beta \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,隶属函数  $u(z_{ij})$  与阈值  $\alpha$  有关,它表征了某一给定失效水平下的隶属特性。

### 2.2 模糊可靠性计算

假定固有频率  $\omega_i$  和激振频率  $f_j$  均服从正态分布。根据正态分布特性,  $\omega_i$  和  $f_j$  的线性组合  $z_{ij} = f_j - \omega_i$  也服从正态分布,其概率密度为:

$$f(z_{ij}) = \frac{1}{\sigma_{z_{ij}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z_{ij} - \bar{z}_{ij})^2}{2\sigma_{z_{ij}}^2}} \quad (-\beta \leq z_{ij} \leq \beta) \quad (4)$$

$$\sigma_{z_{ij}} = \sqrt{\sigma_{f_j}^2 + \sigma_{\omega_i}^2} \quad (5)$$

式中  $\bar{z}_{ij} = \bar{f}_j - \bar{\omega}_i$ ;  $\sigma_{f_j}$  为第*j*个激振频率的方差;  $\sigma_{\omega_i}$  为第*i*阶固有频率的方差。

由模糊事件的概率可以得到模型模糊共振失效概率为:

$$P_{ij} = \int_{-\beta}^{\beta} u(z_{ij}) f(z_{ij}) dz_{ij} \quad (6)$$

分别将式(3)、(4)代入式(6),经过标准正态函数处理后可得:

$$P_{ij} = \sqrt{\frac{0.020 \cdot 81 \bar{\omega}^2}{2\sigma_{z_{ij}}^2 + 0.020 \cdot 81 \bar{\omega}_i^2}} e^{-\frac{\bar{z}_{ij}^2}{2\sigma_{z_{ij}}^2 + 0.020 \cdot 81 \bar{\omega}^2}} [\phi(y_1) + \phi(y_2)] \quad (7)$$

式中

$$y_k = \sqrt{\frac{2\sigma_{z_{ij}}^2 + 0.020\ 81\bar{\omega}_i^2}{0.020\ 81\bar{\omega}_i^2\sigma_{z_{ij}}^2}} \left( \mu_k - \frac{0.020\ 81\bar{\omega}_i^2\bar{z}_{ij}}{2\sigma_{z_{ij}}^2 + 0.020\ 81\bar{\omega}_i^2} \right)$$

$k=1,2$ ;  $\mu_1 = -\beta$ ;  $\mu_2 = \beta$ ;  $\phi(x)$  为标准正态分布函数。在结构系统中, 只要某一个激振频率与固有频率接近, 就会使系统发生共振, 整个系统处于失效或准失效状态<sup>[9]</sup>。因此, 结构系统应为串联系统, 其失效概率为:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij}) \quad (8)$$

可靠度为:

$$R = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij}) \quad (9)$$

### 3 算例

本文采用一款有255个I/O焊点(15×15)的全阵列叠层CSP/BGA封装产品, 各组件基本尺寸如图3所示, 其材料参数如表1所示。

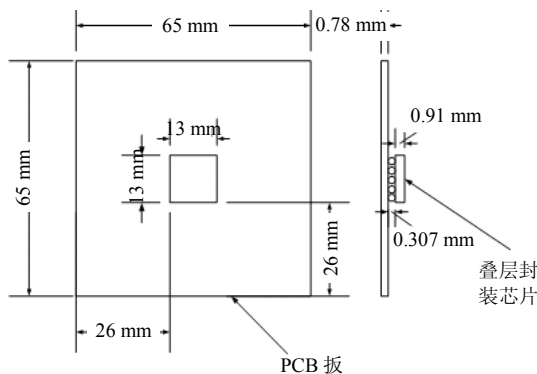


图3 封装组件基本尺寸

表1 材料参数

封装组件	弹性模量/GPa	泊松比	密度/kg·m <sup>3</sup>
芯片	100.0	0.30	1 811
局部实体焊点(Solid73)	30.5	0.35	8 470
等效梁单元(BEAM188)	36.3	0.35	8 470
PCB板	16.89(XY)	0.11(XY)	1 971
	7.436(Z)	0.39(XZ)	
	7.436(Z)	0.39(YZ)	

根据材料参数和有限元模型, 利用ANSYS分析得到该CSP封装的前6阶模态, 如表2所示。

表2 前6阶模态数据

$\bar{\omega}_1$	$\bar{\omega}_2$	$\bar{\omega}_3$	$\bar{\omega}_4$	$\bar{\omega}_5$	$\bar{\omega}_6$
558.96	684.57	1 149.40	1 537.60	1 776.80	2 015.70

假设阈值  $\alpha = 0.15$ ,  $\bar{f}_1 = 350$  Hz,  $\sigma_{f_1} = 10$  Hz,

$\sigma_{\omega_i} = 10$  Hz, 利用式(4)~(10)可得模糊共振失效概率  $P_{11} = 0.003\ 611\ 29$ ,  $(P_{21} \sim P_{n1}) \leq 3.2 \times 10^{-4}$ , 模型可靠性为  $R = 0.996\ 389$ 。

按照经典振动可靠性理论, 把  $f = (0.9 \sim 1.1)$  作为

$$\text{共振区, 其失效概率 } P = \phi\left(\frac{r_i - \bar{z}_{ij}}{\sigma_{z_{ij}}}\right) - \phi\left(\frac{-r_i - \bar{z}_{ij}}{\sigma_{z_{ij}}}\right),$$

其中,  $r_i = 0.1\omega_i$ , 代入上述数值后可得  $P_{11} \sim P_{n1} \approx 0$ 。

由此可看出, 使用模糊理论模型计算出的失效概率大于使用精确方式计算的结果, 与文献[2]的趋势相同, 这主要是因为综合考虑了其他影响因素, 因此分析结果更接近实际。

### 4 结束语

通过合理的简化, 本文利用有限元方法建立复杂的CSP封装的振动分析模型。并在有限元分析的基础上, 结合模糊理论和共振理论提出了CSP振动模糊可靠性理论模型。该模型主要具有如下特点:

- (1) 容易建立叠层CSP封装的振动模型, 且对模型的分析容易实现。
- (2) 充分考虑了系统的不确定性和环境的模糊性, 使分析的结果更接近实际情况。

### 参 考 文 献

- [1] 田民波. 电子封装工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 周海浪, 曾庆元. 结构振动的模糊可靠性分析[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(6): 645-647.
- [3] 中国电子学会生产技术学会丛书编委会. 微电子封装技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [4] CORBIN J S. Finite element analysis for solder ball connect (SBC) structural design optimization[J]. IBM J Res Develop, 1993, 37: 585-595.
- [5] PITARRESI J M, AKANDA A. Random vibration response of surface mount lead/solder joint[J]. Adv Electron Packag, 1993, EEP-4-1: 207-215.
- [6] YANG Q J, LIN G H, PANG H L J, et al. Vibration reliability analysis of a PBGA assembly under foundation excitations[C]//ASME International Electronic Conference, Advances in Electronic Packaging. Maui, USA: [s. n.], 1999.
- [7] PERKINS A, SITARAMAN S K. Thermo-mechanical failure comparison and evaluation of ccga and cbga[C]// Electronic Packages 2003 Electronic Components and Technology Conference. New Orleans, USA: [s. n.], 2003.
- [8] 刘普寅, 吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [9] 张义民, 闻邦椿. 随机结构系统振动的频率可靠性分析[J]. 机械强度, 2002, 24(2): 240-242.

编辑 黄 莘