

高 g 值冲击下板级电路的动态响应研究

郑高泽, 徐鹏*

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 新型动能武器中的弹载电子封装设备模块在连续多脉高过载冲击作用下会产生不可逆的损伤, 从而导致其失效, 影响弹药的杀伤效能。在此背景下选取电子封装设备中的板级电路为研究对象, 从理论上对基板和带有集中质量的电路板进行振动分析, 得出了其固有频率表达式。并利用有限元软件 ANSYS 对板级电路进行了模态分析, 其主要振型是在电路板 Z 轴方向的弯曲振动。利用显式动力分析软件 LS-DYNA 对板级电路进行了连续多脉冲高过载冲击下的仿真分析, 4种不同类型的连续多脉冲加速度载荷下印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上的最大等效应力始终出现在螺柱孔位附近。且随着加载载荷的脉冲间隔时间减小, PCB板的最大等效应力增大。利用冲击试验台对板级电路进行高过载冲击试验, 方板和圆板在70 804 g 和91 762 g 载荷下均未发生元器件脱落、引线断裂等现象, 故板级电路具有较好的抗高 g 值冲击性能, 不容易发生失效。

关键词: 板级电路; 集中质量; 模态分析; 连续多脉冲; 高 g 值冲击

中图分类号: TP122

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025042

引用格式: 郑高泽, 徐鹏. 高 g 值冲击下板级电路的动态响应研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 337-345.

ZHENG Gaoze, XU Peng. Study on dynamic response of board-level circuits under high g -value shock [J].

Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 337-345.

Study on Dynamic Response of Board-Level Circuits Under High g -Value Shock

ZHENG Gaoze, XU Peng*

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The electronic packaging equipment module in the new kinetic energy weapon will cause irreversible damage under the action of continuous multi-pulse high overload impact, resulting in its failure and affecting the lethality of the ammunition. In this context, the board-level circuit in the electronic packaging device is selected as the research object, and the modal analysis of the substrate and the circuit board with concentrated mass is theoretically carried out, and the natural frequencies are obtained. The modal analysis of the board-level circuit and the simulation analysis of continuous multi-pulse high overload impact are carried out by using the finite element software ANSYS and the explicit dynamic analysis software LS-DYNA, and the main mode shape is the vibration in the Z -axis direction of the circuit board. The maximum equivalent stress on the printed circuit board (PCB) under four different types of continuous multi-pulse acceleration loads always occurs near the stud hole position. As the pulse interval time of the loading load decreases, the maximum equivalent stress of the PCB board increases. The high overload impact test is carried out on the board-level circuit by using the impact test bench, and the square plate and the round plate does not fall off the components and break the lead under the load of 70 804 g and 91 762 g , respectively, so the board-level circuit has good anti-high g value impact performance and is not easy to fail.

收稿日期: 2024-09-10

作者简介: 郑高泽(1998—), 男, 硕士生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: 1792301535@qq.com。

* **通信作者:** 徐鹏(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事高速冲击动力学分析与测试技术研究。E-mail: xptj1972@163.com。

Key words: board-level circuitry; concentrate on quality; modal analysis; continuous multi-pulse; high-g value shock

0 引言

新型动能武器(高性能火炮)具备超高发射速度,加速过程存在连续多脉冲高过载冲击过程。其中,电子封装设备(传感器和信号采集处理器等)在高过载冲击作用下会损伤失效,影响其精准打击效果。新型动能武器中的弹载电子封装设备模块在连续多脉冲高过载冲击作用下会产生不可逆的损伤,从而导致其失效,影响弹药的杀伤效能。目前,电子封装设备连续多脉冲高过载冲击失效机理尚不明确,相关防护技术无法实施,火炮的杀伤效能无法提高。而板级电路为弹载电子封装设备中重要的器件,研究高冲击下板级电路的动态响应迫在眉睫,不少学者已经从理论、计算机模拟、实验等方面对板级电路进行了不同深度的研究。

赵兴海等^[1]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上的焊盘在法向、纵向(平行于芯片管脚)和横向(垂直于芯片管脚)受到的高冲击力进行了数值模拟研究,并对比了来自不同方向的冲击力对焊点可靠性的作用效果。研究发现,当冲击力方向相同时,焊盘的抗冲击能力按法向、纵向和横向递减。金超超^[2]根据 JESD22B-111 标准和内聚力模型,对无铅 TFBGA 组件在板级跌落试验中的焊球损伤进行了模拟分析,研究显示,在进行跌落测试时,位于板材边缘的焊球承受的应力和应变更大,PCB 和封装体的翘曲以及它们的变形不一致是导致焊球失效的主要原因。此外,焊点的高度越高,其稳定性和可靠性也越强;而直径较大的焊点在跌落测试中显示出更优越的抗冲击能力。

张波等^[3]提出的梁函数组合技术可以有效降低 JEDEC 标准跌落冲击载荷对板级封装的影响,其中包括对其弯曲及相关参量的测量。通过对该技术的研究,可以更好地理解其对 JEDEC 标准跌落的反馈机制。胡超等^[4]通过 ANSYS Workbench 对某 PCB 进行了有限元建模,得出的理论和实际应用的结果相差甚微。这些研究发现,第一个模式在板级封装的振动过程中起着重要作用。经过仿真和实际测试可知,四角固定的限制条件会显著改变 PCB 的振动特征。为此,根据国家规范的半正弦波和激励谱,运用冲击响应和随机振动仿真技术可评估这种材料

的振动特征。经过对这块 PCB 的力学行为进行研究,发现其具备良好的弹性响应,最大位移量达到了 0.002 54 mm,而局部应力也到达了 39.003 MPa,这些响应都符合相应的振动模式,因此该电路板具备良好的稳定性和耐冲击性。

为了提高计算机中使用的 PCB 的寿命,Muthuram 等^[5]通过实验和数值模拟,试图将 PCB 组件的基本固有频率尽可能提高,以最小化动态负载作用对其的影响,并利用有限元软件 ANSYS 中的优化工具,在指定的设计空间中找到 6 个紧固螺钉的最优支撑位置。结果表明,根据优化结果改变支撑位置,基波固有频率可以提高到 51.1%,该研究提供了一种基于支撑位置优化来提高 PCB 寿命的新方法。

刘文博^[6]在进行电路板冲击试验时,总结出以下失效模式:当冲击过载低于 32 000g 时,主要的故障是由于电路板的变形导致元器件脱落。冲击力越大,电路板的弯曲和变形越严重,从而使得更多元器件脱落。元器件的脱落程度与其体积和质量有关,体积大的元器件更容易脱落,这些脱落的元器件通常集中在电路板的边缘和过孔区域。因此,在设计电路板时,应优先在这些区域安置体积较小、不易脱落的元器件。

本文以电子封装设备中的板级电路为研究对象,分别对基板和板上承载电子元件的 PCB 板进行振动模态分析,并利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对 PCB 板进行了计算模态分析和连续多脉冲高过载冲击仿真模拟,最后利用冲击试验台进行板级电路冲击试验,并观察其是否发生引线断裂,电阻以及电容脱落现象。

1 PCB 板振动基础理论

1.1 模态分析

振动模式是弹性结构的固有和整体特征。通过对结构物在特定敏感频率范围内的主要各阶模态进行模态分析,可以评估该结构在各种内部或外部振源影响下的实际振动表现。因此,模态分析对于结构的动态设计和设备故障的诊断至关重要^[7]。

模态分析是评价各类振动特性的一种高效方法。通过应用模态分析理论,研究人员能够匹配试验导纳函数的曲线,从而确定结构的模态参数,并建立

对应的模态模型。利用模态叠加原理,当载荷的时间进程已知时,就可以预测结构在实际振动中的响应过程或响应谱^[8]。

随着科技的进步,市场上已经出现了许多不同等级和基于多种原理的模态分析硬件与软件产品^[9]。

1.2 基板振动模态分析

通常来说,PCB板是构成电子部件支撑的基板。印制板的性能、质量、加工性、生产成本和生产水平主要依赖于所用的基板材料。尽管基板是由基底材料和内部布线构成,但在工程实践中,它通常被认为是一个具有均匀厚度和性质的薄板,这一假设基于小挠度的弹性薄板理论^[10],根据该理论可以获得基板的振动微分方程为

$$D_0 \nabla^4 w(x, y, t) - \rho h \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = P(x, y, t), \tag{1}$$

式中: $D_0 = Eh^2/12(1 - \mu^2)$ 为抗弯刚度; $\nabla^4 = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)$ 为重调和算子; ρ 为密度; h 为厚度; $w(x, y, t)$ 为板在 t 时刻的横向挠度; $P(x, y, t)$ 为横向外载荷; E 为杨氏弹性模量; μ 为泊松比。

ω_i 定义为基板第 i 振动固有频率, $W_i(x, y)$ 为第 i 振型。由模态叠加原理可知,挠度 $w(x, y, t)$ 与 $W_i(x, y)$ 的关系为

$$w(x, y, t) = \sum_{i=1}^n W_i(x, y) \sin(\omega_i t + \varphi), \tag{2}$$

式中: n 为板的全部自由度数; $\sin(\omega_i t + \varphi)$ 为用来进行坐标转换的正弦函数,其功能是实现到模态坐标的转化。

令 $P(x, y, t) = 0$, 对式(1)化简处理,可得基板自由振动方程为

$$D_0 \nabla^4 W_i(x, y) - \omega_i \rho h W_i(x, y) = 0. \tag{3}$$

式(3)定义了关于基板振动微分方程的特征值问题,其中特征值方根表示固有频率,特征向量代表振型。

依据泛函驻值理论和能量守恒定律^[10],为了获得固有频率平方的函数式,必须首先求解基板横向振动的最大弹性势能 U_{\max} 与最大动能 T_{\max}

$$U_{\max} = \iiint_V \frac{1}{2} \epsilon^T \sigma dV = \frac{D_0}{2} \iint_{\Omega} \mathbf{K}^T D_1 \mathbf{K} dx dy, \tag{4}$$

$$T_{\max} = \iiint_V \frac{1}{2} \omega_i^2 \rho W_i^2(x, y) dV = \frac{1}{2} \omega_i^2 \iint_{\Omega} \rho h W_i^2(x, y) dx dy, \tag{5}$$

式中: V 和 Ω 分别为基板的体积域和面域; ϵ 为单

元应变; σ 为单元应力; D_1 为单元刚度矩阵。公式中的 K 为

$$\mathbf{K} = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial x^2} & \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial y^2} & \frac{\partial W_i(x, y)}{\partial x \partial y} \end{array} \right]^T. \tag{6}$$

由能量守恒原理 $U_{\max} = T_{\max}$, 可推导出基板振动固有频率的泛函表达式为

$$\omega_i^2 = \frac{D_0 \iint_{\Omega} \mathbf{K}^T D_1 \mathbf{K} dx dy}{\iint_{\Omega} \rho h W_i^2(x, y) dx dy}. \tag{7}$$

1.3 带有集中质量的PCB板的模态分析

在PCB板上装配电子元件时,这些元件可以视作集中的质量。此时PCB板的密度可以表述为

$$\rho' = \rho_b + m \delta(x - x_m) \delta(y - y_m), \tag{8}$$

式中: ρ_b 为基板的密度; m 为集中质量大小; (x_m, y_m) 为质量所在位置; δ 为用于描述集中质量的位置函数,

$$\delta(x - x_m) \delta(y - y_m) = \begin{cases} 1, & x = x_m, y = y_m, \\ 0, & x \neq x_m, y \neq y_m. \end{cases} \tag{9}$$

用式(8)替换式(7)密度 ρ , 可解出安装元器件后的固有频率为

$$\omega_i^2 = \frac{D_0 \iint_{\Omega} \mathbf{K}^T D_1 \mathbf{K} dx dy}{\iint_{\Omega} \rho_b h W_i^2(x, y) dx dy + \Psi}, \tag{10}$$

式中:

$$\Psi = \iint_{\Omega} m h W_j^2(x_m, y_m) dx dy = a b h m W_j^2(x_m, y_m), \tag{11}$$

a, b 分别为基板的长和宽。

对比式(7)与式(10)可以看出 Ψ 始终保持正值,所以相对于基板的固有频率有所降低,下降的幅度取决 Ψ 值大小, Ψ 值越大,固有频率越低。

2 板级电路仿真模拟

2.1 计算模态分析

计算模态分析属于理论模态分析,通过有限元法对各种振动结构进行数值计算,以确定其固有频率和固有振型矢量^[11]。本文使用有限元分析软件 ANSYS 进行分析。

2.1.1 有限元模型的建立

选取电路板上有电子元件且四周带有小孔的圆形板和方形板作为研究对象,所建立方形板

的尺寸为(长*宽*厚)37.87 mm*27.81 mm*1 mm,圆形板的直径为50 mm,小孔直径均为2.5 mm,如图1、图2所示。方形板、圆形板上均布有若干个电容与芯片,材料均为线弹性材料(MAT ELASTIC),板与元器件的接触方式为面与面的捆绑接触。其中,方形板有限元模型共划分单元140 929个,节点317 706个,圆形板有限元模型共划分单元259 977个,节点174 474个。表1详细列出了PCB板的材料特性。

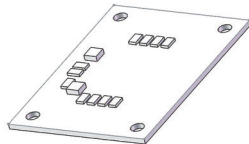


图1 方形板
Fig.1 Square plate

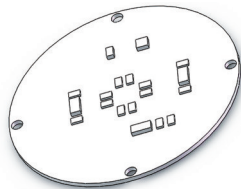


图2 圆形板
Fig.2 Square plate

表1 材料参数
Tab.1 Material parameters

	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	μ
基板材料	1 910	17.7	0.39
电容材料	5 700	108	0.30
芯片材料	2 330	131	0.23

2.1.2 理论模态分析结果

实际安装条件决定边界条件的设置,通过在四角的小孔使用4颗螺钉进行固定。在ANSYS软件中,利用子空间方法进行模态分析以及参数提取。前9阶模态振型如图3、图4所示,其主要振型是与电路板面垂直方向的振动,但是电路板实际上也会有一定的扭转。

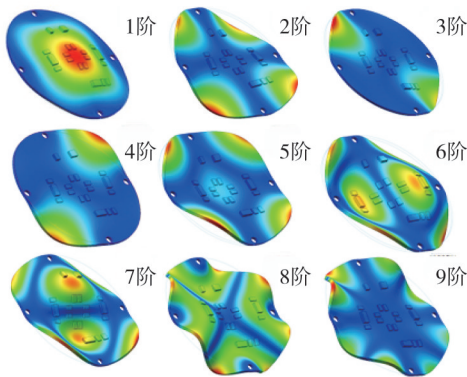


图3 圆形板的前9阶模态振型
Fig.3 The first 9 modal shapes of circular plates

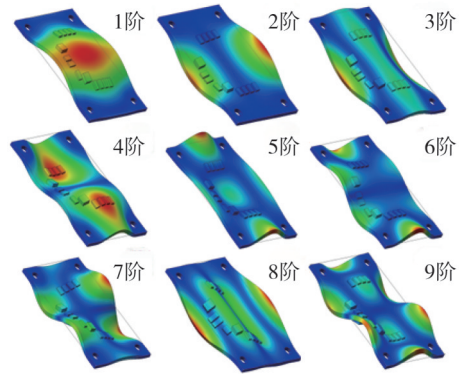


图4 方形板的前9阶模态振型

Fig.4 The first 9 modal shapes of square plates

在冲击作用下,电路板与器件之间会因为电路板的变形产生拉压应力,容易发生器件或引脚脱焊等失效现象。表2展示了前9阶固有频率的数据。

表2 PCB板前9阶固有频率
Tab.2 First 9 natural frequencies of PCB board

阶数	固有频率/Hz	
	圆形板	方形板
第1阶	1 956.9	2 865.7
第2阶	2 713.4	4 168.8
第3阶	2 817.0	6 234.6
第4阶	2 832.2	6 643.4
第5阶	3 436.4	9 586.2
第6阶	5 132.7	9 909.8
第7阶	5 251.4	10 355.0
第8阶	7 512.8	13 574.0
第9阶	7 896.4	13 660.0

2.2 连续多脉冲高过载冲击

2.2.1 连续多脉冲冲击载荷

根据脉冲间隔时间不同,将连续多脉冲冲击载荷类型分为4种(脉冲间隔时间 $\Delta t > 0$, $\Delta t = 0$, $\Delta t < 0$, $\Delta t \approx T_s$),如图5所示。

2.2.2 高冲击有限元模拟

借助有限元软件ANSYS和显式动力分析软件LS-DYNA对电路板进行不同类型的连续多脉冲高过载冲击(脉宽为 $T_s = 0.2 \text{ ms}$,加速度为 $20\ 000g$),如图5所示。

所建立PCB基板的尺寸为(长*宽*厚)37.87 mm*27.81 mm*1 mm,密度为 $1\ 910 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,板上布有若干个电容与芯片,材料均为线弹性材料(MAT ELASTIC),板与元器件的接触方式为面与面的捆绑接触,其有限元模型共划分单元140 929个,174 474个节点。表1展示了PCB板的详细材料参数,有限元模型如图6所示。

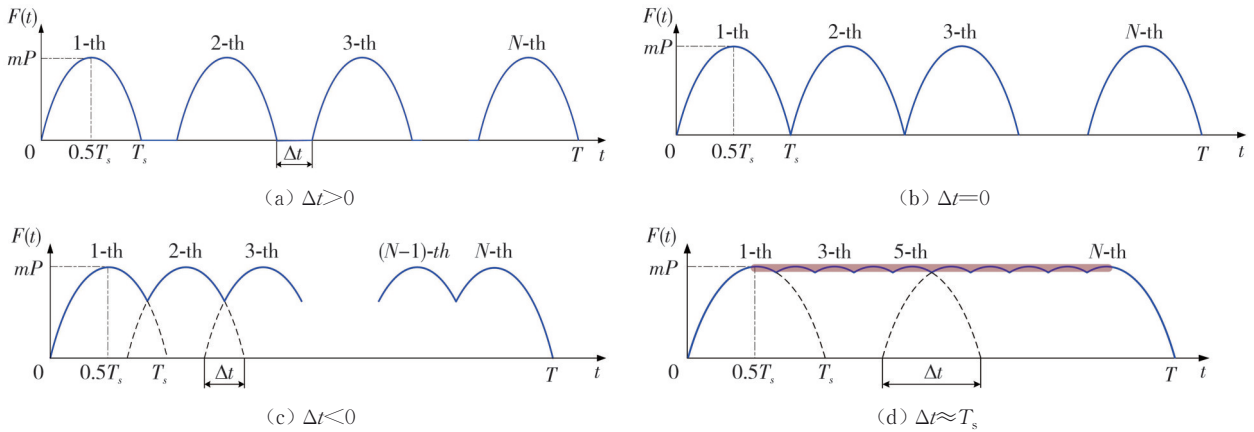
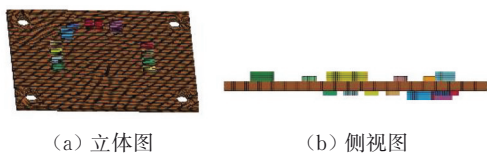


图 5 连续多脉冲冲击载荷曲线

Fig. 5 Continuous multi-pulse shock load curves



(a) 立体图 (b) 侧视图

图 6 PCB板的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of a PCB board

通过 LS-DYNA 在螺柱孔位施加 4 种不同波形的加速度，方向垂直于板面，载荷作用时间为 5 ms，计算时间为 5.5 ms。图 7(a)~(d) 分别为脉冲间隔时间 $\Delta t > 0$ ， $\Delta t = 0$ ， $\Delta t < 0$ ， $\Delta t \approx T_s$ 的加速度载荷曲线。

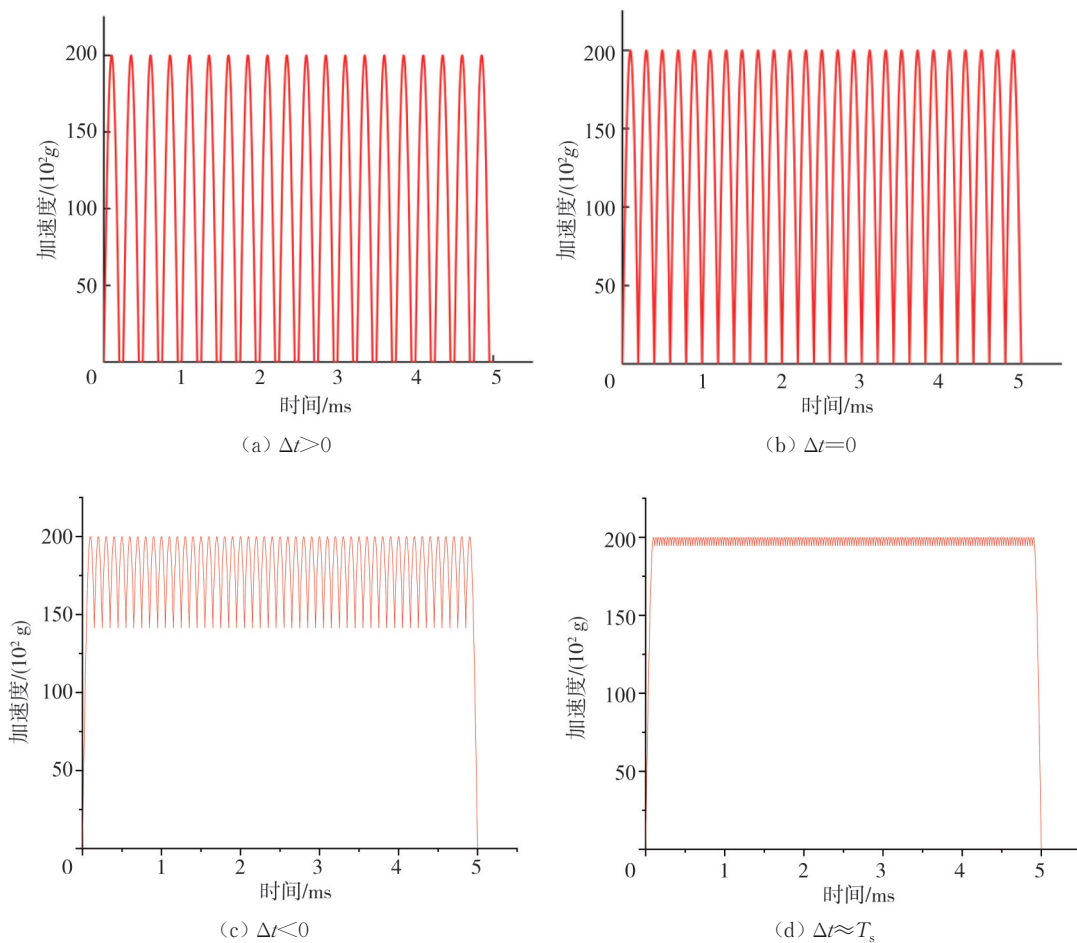


图 7 载荷曲线

Fig. 7 Load curve

2.2.3 冲击响应分析

从计算结果中任意选取冲击过程中的某一时刻，如 2.5 ms，在图 7(a) 的载荷作用下，2.5 ms 时的应力云图如图 8 所示，最大等效应力约为

刻，如 2.5 ms，在图 7(a) 的载荷作用下，2.5 ms 时的应力云图如图 8 所示，最大等效应力约为

497 MPa, 主要集中在螺柱孔附近区域。图 7(b)~(d)载荷下的等效应力分布也与图 8 相似, 最大应力位置也出现在小孔附近, 最大等效应力分别为 611、701 和 696 MPa。

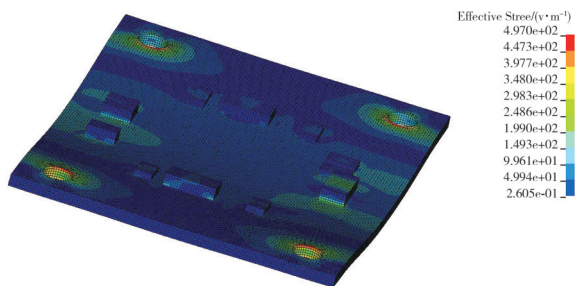


图 8 等效应力云图

Fig. 8 Equivalent force contour

对计算结果分析发现, 4 种不同类型的加速度载荷下 PCB 板上的最大等效应力始终出现在螺柱孔位四周, 且贴近板中心点的一侧。在图 7(a)的载荷作

用下, 在 1.5 ms 时, 记录了最大等效应力, 其值大约为 734 MPa。表 3 展示了 4 种不同载荷条件下的最大等效应力数据。由表可以看出, 随着加载载荷的脉冲间隔时间减小, PCB 板的最大等效应力有所增加。

表 3 最大等效应力

Tab. 3 Maximum equivalent stress

	$\Delta t > 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t < 0$	$\Delta t \approx T_s$
时间/ms	1.5	1.1	1.55	1.55
最大应力/MPa	734	831	985	1 065

以 PCB 板面上的中间位置为研究对象, 分析等效应力的变化, 图 9 为不同加速度载荷下的等效应力—时间曲线, 图 9(a)~(d) 分别对应图 7(a)~(d) 加速度载荷下的应力—时间曲线, 达到的最大应力分别为 145, 168, 161 和 178 MPa; 时间分别在 0.2, 4.6, 0.25 和 5.2 ms。

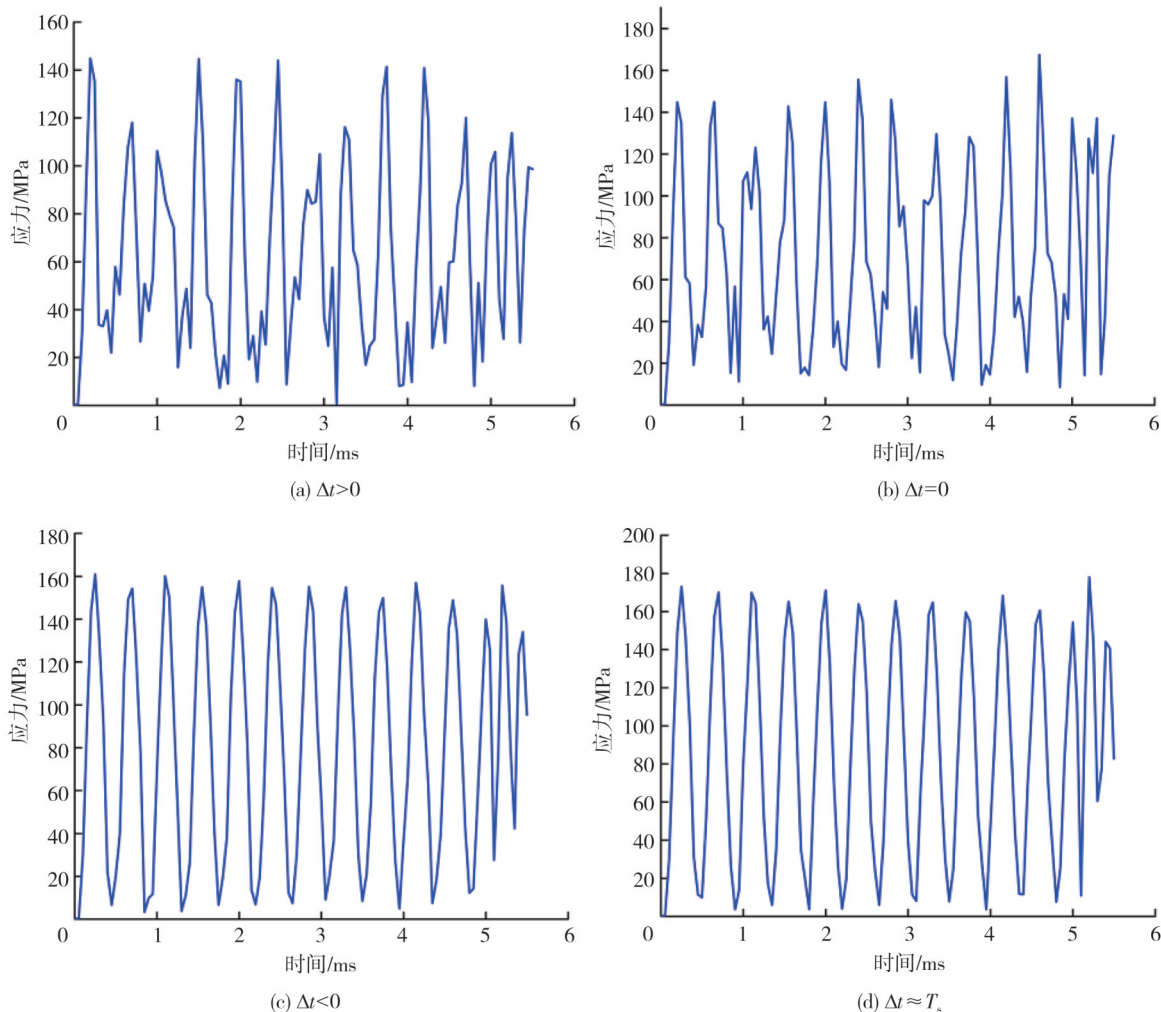


图 9 等效应力-时间曲线

Fig. 9 Equivalent stress-time curve

3 板级电路冲击试验

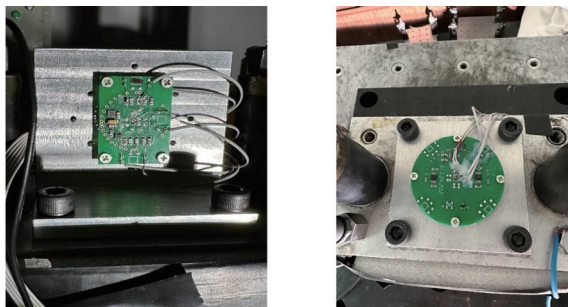
3.1 冲击实验设备

板级电路冲击实验设备包括冲击试验机、加速度传感器、电荷放大器和数据采集器。

冲击模拟试验旨在模拟新型动能武器(如高性能火炮)的高过载冲击。根据 GJB150. 18-86《军用设备环境试验方法》^[12]和 GJB360. 8-1987《电子及电气元件试验方法高温寿命试验》^[13], 使用的冲击波类型包括半正弦波、后峰锯齿波和梯形波。其中, 半正弦波因其易于通过冲击试验机实现而被广泛使用。在实验中, 使用跌落式冲击机配合弹性缓冲垫来生成半正弦波, 以此模拟新型动能武器所经受的高过载冲击环境。

3.2 试验过程

冲击试验机的工作台面上有夹具或固定试件的螺纹和加速度传感器, 电路板通过压板和螺丝杆固定在冲击台面上, 方形板与圆形板的安装结构如图 10 所示。



(a) 方形电路板夹持图 (b) 圆形电路板夹持图

图 10 电路板夹持图

Fig. 10 Circuit board clamping diagram

首先, 工作台面通过动齿轮在两侧导向柱的引导下升至预设高度, 此时气压装置紧紧固定工作台在导向柱上, 使其保持在设定高度不动。随后, 提升台面的动齿轮系统回落至最低位置。在进行冲击测试时, 气压装置解除压力, 工作台面便沿导向柱自由下落, 与试验机底座碰撞, 造成工作台面及其上的试验物品和加速度传感器承受向上的冲击力。通过这种传感器可以获知试件遭受的冲击载荷。图 11 为试验中使用的 CL-100 型跌落式冲击试验机, 利用高速摄像机以 50 000 帧/s 的帧率拍摄观察板级电路在冲击过程中的动态响应, 装置如图 12 所示。完成冲击试验后, 观察元器件是否从板级电路上脱

落或管脚严重变形。

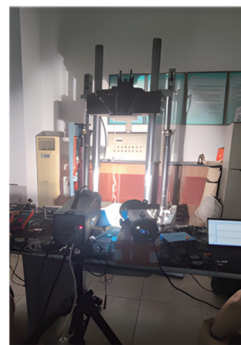


图 11 冲击试验机

Fig. 11 Impact test bench



图 12 高速摄像装置

Fig. 12 High-speed camera setup

3.3 试验结果

利用冲击试验台对电路板共进行了 13 次冲击试验, 其中方板 4 次(竖直放置), 圆板 8 次(水平放置), 部分冲击数据记录如表 4 所示, 部分加载的加速度—时间曲线如图 13 所示。高速摄像机拍到水平放置圆板的动态响应如图 14 所示, 可以看到电路板发生明显的弯曲。

表 4 冲击数据记录表

Tab. 4 Impact Data Record Sheet

序号	方板加速度峰值/g	圆板加速度峰值/g
1	8 014	16 786
2	22 576	17 587
3	32 620	29 950
4	70 804	33 739
5	—	44 969
6	—	48 579
7	—	53 657
8	—	91 762

每次冲击试验后观察电路板是否发生元器件脱落、引线断裂等现象。图 15 为受到 70 804g 冲击载荷下的方板, 图 16 为受到 91 762g 冲击载荷下的圆板, 均未发生失效现象, 故作为电子封装设备中的板级电路具有较好的抗高 g 值冲击性能, 不容易发生失效。

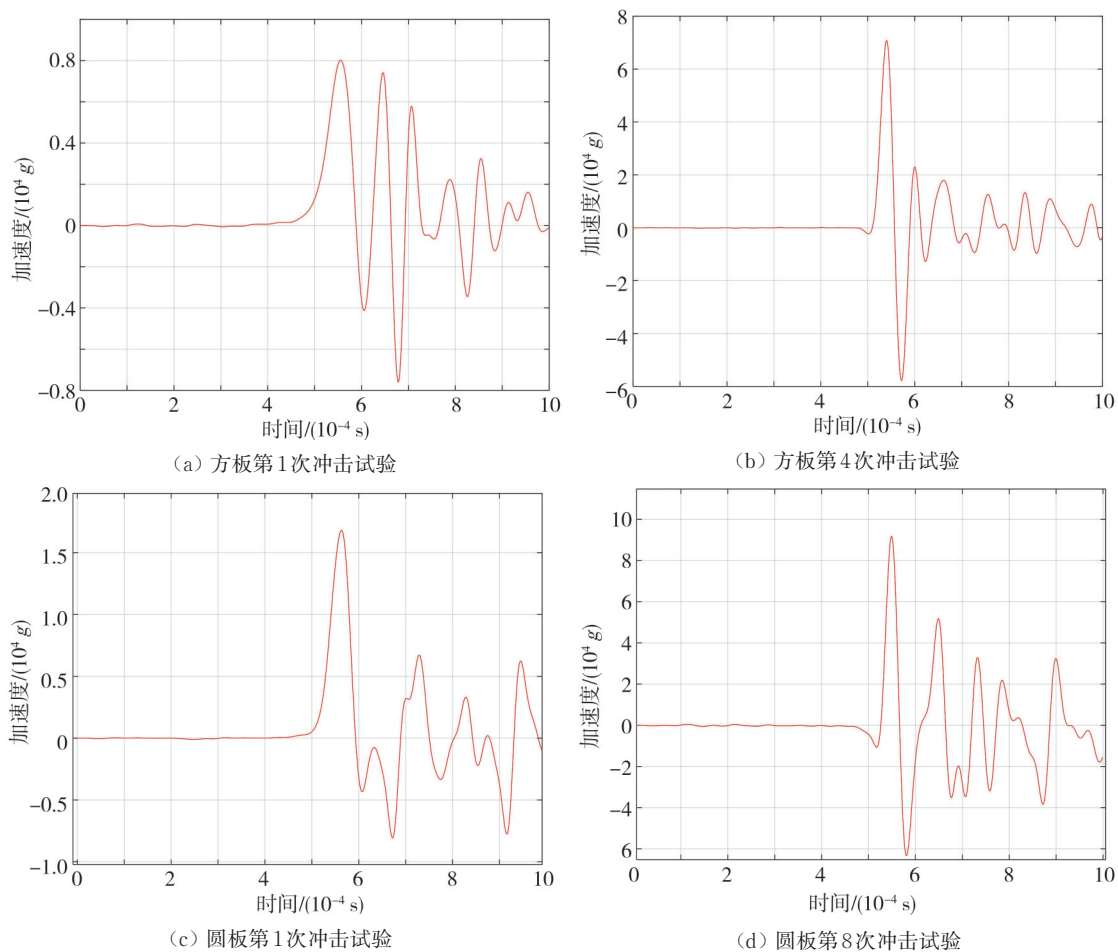


图13 板级电路冲击试验的加速度-时间曲线

Fig. 13 Acceleration-time curve of the 4th impact test of a square plate

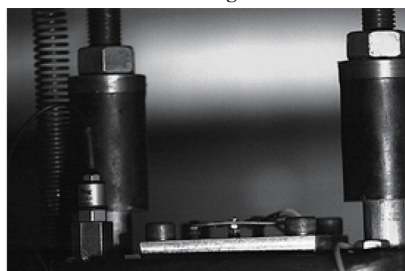


图14 高g值冲击下水平放置圆板的动态响应

Fig. 14 Dynamic response of horizontally placed round plates under high g-value impact

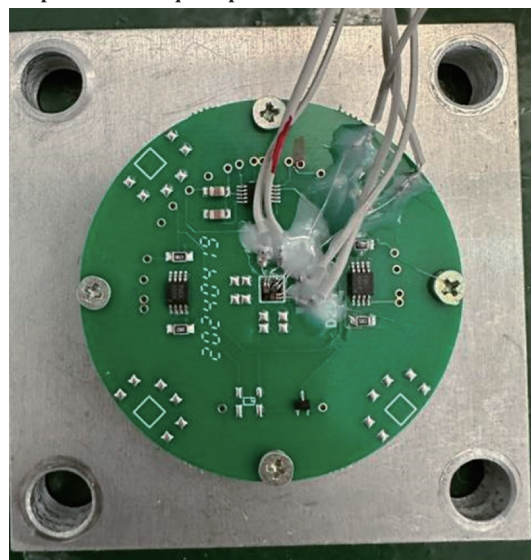


图16 受到91762g冲击载荷下的圆板

Fig. 16 Round plate subjected to 91762g shock load

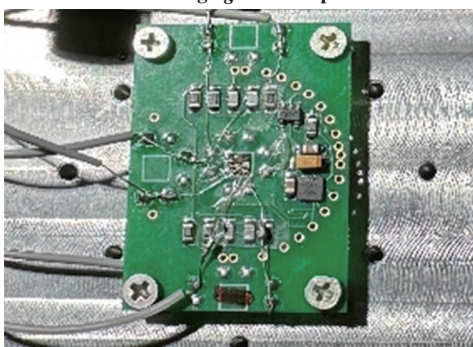


图15 受到70804g冲击载荷下的方板

Fig. 15 Square plate subjected to 70804g shock load

4 结论

1) 根据弹性薄板小挠度理论得出基板的振动微分方程, 再由泛函驻值理论和能量守恒定律推

导出基板振动固有频率的泛函表达式,从而得到带有集中质量 PCB 板的振动固有频率,其固有频率相比基板有所降低。

2) 借助 ANSYS 软件获得了板级电路的前 9 阶振型和固有频率。其主要振型是在电路板 Z 轴方向的振动,但是电路板实际上也会有一定的扭转。在冲击作用下,电路板与器件之间会因为电路板的变形产生拉压应力,容易发生器件或引脚脱焊等失效现象。

3) 4 种不同类型的连续多脉冲加速度载荷下 PCB 板上的最大等效应力始终出现在螺柱孔位附近。而当载荷的脉冲间隔时间缩短时,PCB 板的最大等效应力会有所增加。

4) 利用冲击试验台对板级电路进行高过载冲击试验,在受到约 70 000g 的载荷时,方板未发现元器件脱落,引线断裂等现象;在受到约 90 000g 载荷时,圆板也未发生失效现象,故板级电路具有较好的抗高 g 值冲击性能,不容易发生失效。

参考文献:

- [1] 赵兴海,丁永红,尤文斌,等. 不同方向高冲击作用下焊盘断裂数值模拟[J]. 工业技术创新, 2014, 1(5): 537-541.
ZHAO Xinghai, DING Yonghong, YOU Wenbin, et al. The numerical simulation of soldering pad breakage with high impact from different directions[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(5): 537-541. (in Chinese)
- [2] 金超超. 微电子封装结构冲击失效的数值研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [3] 张波,丁汉,盛鑫军. 板级电子封装在跌落冲击载荷下的动态响应分析[J]. 振动与冲击, 2008, 27(6): 108-113.
ZHANG Bo, DING Han, SHENG Xinjun. Dynamic response of a board-level electronic package under drop impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(6): 108-113. (in Chinese)
- [4] 胡超,刘芳,周嘉诚,等. 基于模态分析的印刷电路板力学性能研究[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(6): 597-602.
HU Chao, LIU Fang, ZHOU Jiacheng, et al. Research on mechanical properties of printed circuit board based on modal analysis[J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(6): 597-602. (in Chinese)
- [5] MUTHURAM N, SARAVANAN S. A modal analysis based optimal mounting support locations of a printed circuit board [J]. Microelectronics International, 2024, 41(2): 89-95.
- [6] 刘文博. 硬目标侵彻引信电路冲击失效机理分析与防护方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [7] 赵小军. 面向压电纳米结构的同轴聚焦电流体喷射打印机理及工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [8] 李永亮,梁强,冯俊. 功率超声铆焊变幅杆的设计与分析[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(4): 591-599.
LI Yongliang, LIANG Qiang, FENG Jun. Design and analysis of power ultrasonic stepped riveted horn[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(4): 591-599. (in Chinese)
- [9] 马永列. 结构模态分析实现方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [11] 张元婷,葛颖,苗媛媛,等. 拼板结构的古筝共鸣面板振动模态研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(5): 132-141.
ZHANG Yuanting, GE Ying, MIAO Yuanyuan, et al. Vibration mode of Guzheng soundboard with composite structure[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(5): 132-141. (in Chinese)
- [12] 国防科学技术工业委员会. 军用设备环境试验方法: GJB150.18-86[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1986.
- [13] 国防科学技术工业委员会. 电子及电气元件试验方法高温寿命试验: GJB360.8-1987[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1987.