

基于颗粒阻尼的 PCB 动力学与电路联合设计研究

肖望强¹, 余少炜¹, 林昌明¹, 刘利杰²

(1. 厦门大学 航空航天学院 福建 厦门 361000; 2. 北京华航无线电测量研究所 北京 100013)

摘要: 对 PCB 在运输与使用过程中受振动影响易产生故障的问题, 提出一种新型的电路板动力学与电路联合设计方法, 能在满足电路设计的前提下, 提高它的抗振特性。基于 PCB 的动力学分析, 确定电路板的模态敏感区域, 结合谐波响应分析确定阻尼器的安装位置。通过离散单元法计算颗粒系统的耗能, 针对颗粒阻尼器模型的设计, 进行颗粒粒径大小、填充率等参数的优化, 并确定颗粒阻尼器在 PCB 上的安装方案, 在此基础上完成整个电路体系的设计。通过仿真与试验相结合, 验证敏感区域安装颗粒阻尼器能使得 PCB 减振效果达到 50% 以上。这种联合设计的方法, 对于提高电路板的抗振特性具有重要意义。

关键词: PCB; 颗粒阻尼; 动力学分析; 离散单元法; 联合设计

中图分类号: V214.19; V19

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.10.019

Research on joint design of dynamics and circuit for pcb based on particle damping

XIAO Wangqiang¹, YU Shaowei¹, LIN Changming¹, LIU Lijie²

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A new joint design method of dynamics and circuit for PCB was presented, which can improve the anti-vibration performance of PCB on the premise of satisfying the circuit design, in order to solve the problem that the vibration of PCB is easily affected by vibration in the process of transportation and use. Firstly, based on the dynamic analysis of PCB, the modal sensitive region of the circuit board was determined, and the mounting position of the damper was determined by the harmonic response analysis. Then the energy dissipation of the particle system was calculated by the discrete element method. According to the design of the particle damper model, the particle size, filling rate and other parameters were optimized, and the installation scheme of the particle damper on the PCB was determined. On this basis, the design of the whole circuit system was completed. Through the combination of simulation and experiment, it was verified that the installation of particle damper in sensitive areas can increase the vibration reduction effect of PCB more than 50%. This joint design method is of great significance for improving the anti-vibration characteristics of the circuit board.

Key words: printed circuit board (PCB); particle damping; dynamics analysis; discrete element method; joint design

为满足我国空天作战概念的创新, 导弹武器正向跨域化、高速化、多用化方向发展。导弹的电子系统能够实现导航、通信、目标识别、跟踪定位等为一体化的多功能技术, 一旦内置的电子设备出现故障, 造成导弹的失误, 将会产生灾难性的后果。PCB (Printed Circuit Board) 是导弹电子设备的重要组成部分,

图 1 为 PCB 在导弹中的应用, 在导弹受到发射阶段的高强度振动和冲击下, 导弹内电子组件会产生严重的动态响应。据统计, 在机械力、电磁力、环境等造成电子设备失效的因素中, 27% 是振动因素造成的^[1-2]。传统的减振措施有很多, 应用较广的减振元件一般采用橡胶隔震器。但橡胶隔震器存在以下问题: 工作温度范围较窄; 隔断热传导路径, 带来热设计困难; 橡胶材料容易老化, 需要定期更换等^[3-5]。为解决橡胶减振器的弊端, 适应未来产品发展需求, 急需开发设计一种不隔断传热路径, 适用温度范围广, 适用频带宽, 不引入直线位移和角位移的新型减振技术。

基金项目: 国家自然科学基金 (51875490); 航空科学基金 (20171668003);

航空动力基金 (6141B090562); 厦门市科技计划项目 (3202Z20173021); 中央高校基本科研业务费专项资金 (20720180063)

收稿日期: 2018-10-19 修改稿收到日期: 2019-01-17

第一作者 肖望强 男 博士 副教授, 1981 年生

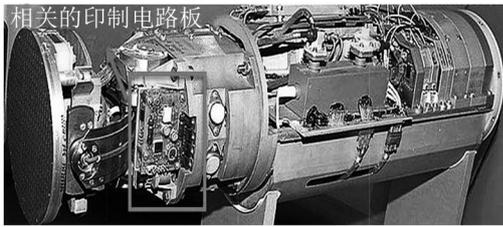


图 1 电路板在导弹中的应用

Fig. 1 Application of circuit board in missile

颗粒阻尼技术是一项振动被动控制的新技术,该技术能够在高低温、辐射等恶劣环境下提供有效的宽频减振,并具有减振效果显著、各向同性、不增加线位移、可靠性高、不改变原结构等诸多优点^[6-10]。将颗粒阻尼应用在 PCB 上,通过颗粒在腔壁中的摩擦与碰撞将动能耗散为热能^[11-15],能有效的减少其在运输与使用过程中振动与冲击的影响。

传统的 PCB 设计一般只考虑电路板图形的布线密度、导线精度等问题,但没有过多考虑电路板的振动问题。因此,本文提出一种新型 PCB 动力学与电路联合设计方法,这种联合设计的核心就是在电路设计之前先进行动力学分析,确定电路板的振动敏感区域,通过敏感点进行阻尼器的设计和阻尼颗粒参数的优化,最终完成电路体系的设计。本文的联合设计的方法能达到有效的减振效果,特别对于导弹、舰艇的 PCB 在恶劣振动环境下具有十分重要的理论意义和工程价值。

本文基于 PCB 动力学特性进行分析,确定阻尼器的安装区域并在非敏感区域设计电路,在敏感区域安装颗粒阻尼器。通过离散单元法计算颗粒的系统耗能,优化颗粒的粒径大小、填充率等参数,提出有效的减振方案。通过与 PCB 试验相结合的方法,研究颗粒阻尼的配置方案对 PCB 运动特性的影响规律。

1 PCB 的动力学设计

1.1 模型建立

PCB 的组件主要由电路板和电子元器件经由机械与电气连接成为一个整体,结构较为复杂。基于本文研究,针对计算模型进行简化,忽略 PCB 上的元器件对 PCB 的刚度与质量影响,将其视为薄板处理并删除无关紧要的非承载结构。PCB 的尺寸为 192 × 179 × 2(mm) 材料为 FR-4 密度为 1.9 × 10³ kg/m³,弹性模量为 1.11 × 10¹⁰ Pa,泊松比为 0.28,三维模型如图 2 所示。

基于 ANSYS 有限元软件,模型采用实体单元 SOLID185,用于构造三维固体结构,把特性参数赋予 PCB 各部分并划分网格后,建立的有限元模型如图 3 所示。

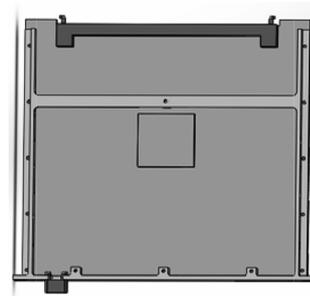


图 2 电路板三维模型

Fig. 2 Circuit board three-dimensional model

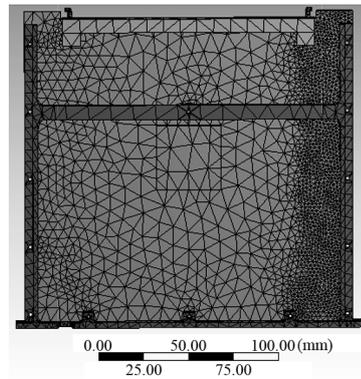


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

1.2 模态分析

本文针对 PCB 的联合设计构想,先根据机箱尺寸与元器件的规格确定 PCB 的尺寸,通过有限元方法确定 PCB 的模态敏感点区域。模态参数为结构动力特性的优化设计提供依据^[16-17],为实现下一步 PCB 的电路设计奠定基础。由 lagrange 方程可得一个 n 自由度的系统运动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为系统质量、系统阻尼和系统刚度矩阵; $\{F(t)\}$ 为外激励矩阵。由于阻尼对系统的固有频率和主振型影响很小,因此可考虑为无阻尼系统,其自由振动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = 0 \quad (2)$$

其特征方程为

$$(K - \omega^2 M)X = 0 \quad (3)$$

解式(3)可得到系统的第 i 阶固有频率 ω_i 与第 i 阶的位移 X_i 。

基于分机壳体(见图 4),使得 PCB 约束为四周固定方式,在有限元软件中进行模态分析。低阶模态能量占比大,因此对于本文而言,选取图 5 的一阶弯曲模态,图 6、图 7 的二阶弯曲与三阶扭转模态。图中的条状图表示了不同位置的总变形量,前三阶所对应最大变形量分别为 203.56 mm,183.75 mm,216.16 mm。因此,图中最大变形区域为振动敏感区域。表 1 为模态分析所得 PCB 前三阶模态固有频率。

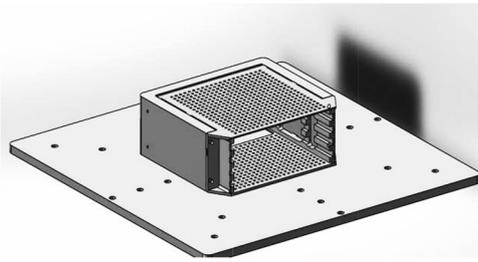


图4 分机壳体

Fig. 4 Extension housing

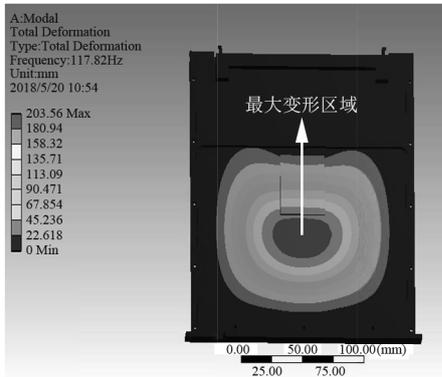


图5 一阶模态振型

Fig. 5 The first-order vibration mode

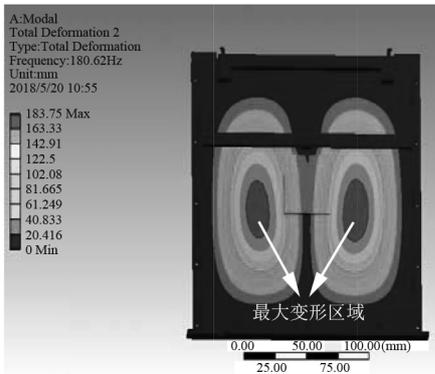


图6 二阶模态振型

Fig. 6 The second-order vibration mode

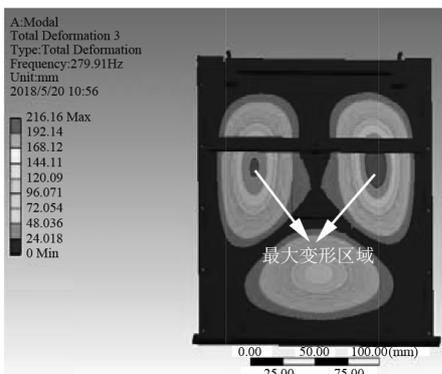


图7 三阶模态振型

Fig. 7 The third-order vibration mode

表1 PCB前三阶模态频率

Tab.1 The first three-order modal frequencies of the PCB

第 n 阶模态	1	2	3
相应模态频率/Hz	117.82	180.62	279.91

通过有限元模态分析,确立了颗粒阻尼安装的敏感区域,为了更进一步确定阻尼器的安装位置,将通过谐响应深入分析。

1.3 谐响应分析

通过电路板的谐响应分析可以确定颗粒阻尼器的安装位置并能得到 PCB 的峰值频率。在模态分析的基础上,对 PCB 采用模态叠加法进行谐响应分析并求解。求解频段为模态分析所得电路板固有频率的最小值与最大值,响应的输出为加速度频率曲线。求解条件为:针对 PCB 的芯片沿 X 轴方向施加 6 mm/s^2 的加速度(见图 8),求得节点位置的加速度频率曲线(见图 9)。

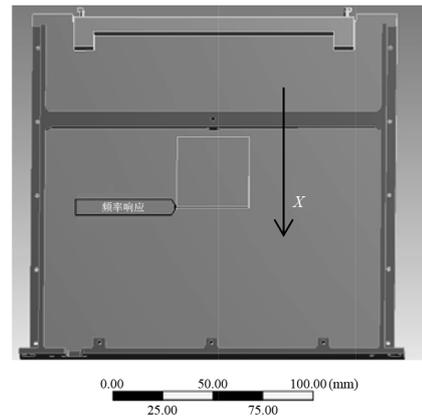


图8 节点位置

Fig. 8 Node position

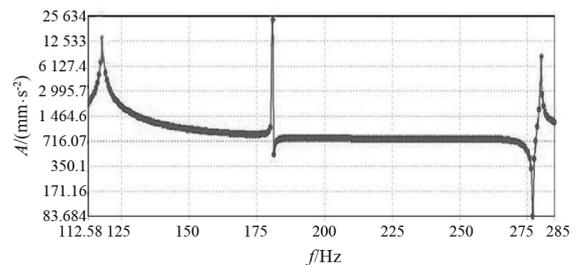


图9 加速度频率曲线

Fig. 9 Acceleration frequency curve

根据以上谐响应分析结果,由加速度频率曲线可知,电路板上的加速度幅值在频率为 118 Hz, 181 Hz, 280 Hz 时振幅出现了峰值,分别为 14.52 m/s^2 , 24.86 m/s^2 , 9.13 m/s^2 且在频率为 181 Hz 时,峰值为最大值。因此,针对 PCB 的减幅,将重点关注二阶模态固有频率。通过谐响应分析,确定阻尼器的安装区域为二阶模态振型处。

1.4 颗粒阻尼器的设计

颗粒阻尼器是高度的非线性型阻尼器,这种阻尼机制随着颗粒的材料、尺寸、填充率等参数的变化而变化^[18-20],基于多变参数前提下,阻尼器的设计尤为重要。

阻尼器的尺寸越大,能够填充的颗粒越多,一般阻尼效应也有一定程度的提高,但是 PCB 的使用面积也

会大大减少。因此,在阻尼器形状的选择上,考虑有效空间的最大利用率,通过在振动的模态点位置合理的设计阻尼器,并进行阻尼器的优化,力争做到用最小的质量获得最优的质量比,从而得到最佳的使用面积。

基于 PCB 的布局,本文采用正方形阻尼器,其外部尺寸为 $30 \times 30 \times 8$ (mm),阻尼器材质为 ZAlZn6Mg 铝合金,采用厚度为 1.0 mm 的铝板进行封闭,阻尼器与 PCB 板之间采用 M2 十字沉头螺栓进行连接。为保证阻尼器与 PCB 之间的固定相连,螺栓底部螺纹可以打上螺纹胶,防止长期使用过程中螺钉的脱落造成阻尼器松动,三维结构如图 10 所示。

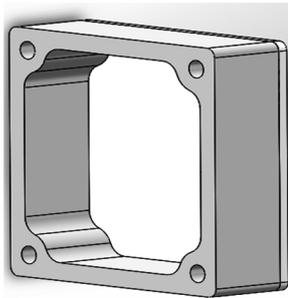


图 10 阻尼器设计
Fig. 10 Damper design

2 基于 PCB 颗粒阻尼器模型的建立

颗粒间通过接触碰撞由此产生法向力与摩擦的切向力,因此,基于计算的精度及速度,本文在不考虑颗粒间接触力的叠加上,引入了弹性力与阻尼力,并将法向简化为线性接触模型,切向简化为库伦摩擦力模型。在 PCB 上装有颗粒阻尼器,给出了颗粒间以及颗粒与阻尼壁板间的接触模型,如图 11 所示,其中: k_n 为颗粒的法向刚度; c_n 为颗粒的法向阻尼; k_t 为颗粒切向刚度; c_t 为颗粒切向阻尼; μ 为耦合器,用来确定颗粒的配对关系。

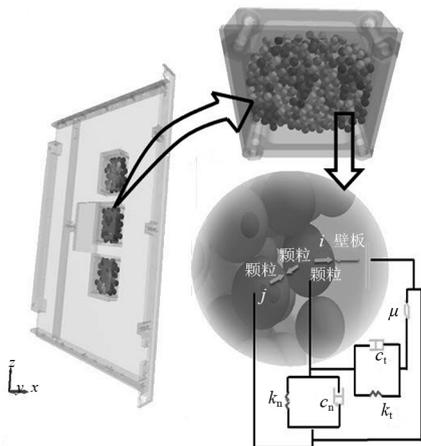


图 11 颗粒的离散元模型
Fig. 11 Particle discrete element model

PCB 在运动过程中,阻尼器中颗粒在某一时刻的运动方程为

$$\sum_{j=1}^{s_i} (F_n + F_t) = m_i \ddot{p}_i - m_i g \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{s_i} T = I_i \frac{d^2 \varphi_i}{dt^2} \quad (5)$$

式中: F_n 与 F_t 为颗粒 i, j 之间法向接触力与切向接触力; p_i 为颗粒位移向量; g 为重力加速度; m_i 为颗粒的质量; I_i 为颗粒惯性矩; φ_i 为颗粒角位移矢量; T 为切向产生的扭矩; s_i 为某时刻与颗粒 i 接触颗粒数量。法向合力可以表示为

$$F_n = F_{kn} + F_{cn} = -k_n D_n - c_n V_n \quad (6)$$

式中: D_n 为颗粒间法向变形量; V_n 为粒子间的法向相对速度,可由 Hertz 接触理论得出具体值。

用 P-P 表示颗粒与颗粒,用 P-D 表示颗粒与阻尼器壁板,则法向弹性系数 k_n 可表示为^[21]

$$\begin{cases} k_n = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - V_i^2}{E_i} \right)^{-1} \left(\frac{2}{R_i} \right)^{-\frac{1}{2}}, & \text{P-P} \\ k_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - V_i^2}{E_i} + \frac{1 - V_j^2}{E_j} \right)^{-1} \left(\frac{1}{R_i} \right)^{-\frac{1}{2}}, & \text{P-D} \end{cases} \quad (7)$$

$$c_n = 2 \sqrt{mk_n} \quad (8)$$

式中: E 为接触单元的弹性模量; V 为泊松比; R 为颗粒半径; m 为接触单元等效质量。

切向合力可以表示为

$$F_t = F_{kt} + F_{ct} = -k_t D_t - c_t V_t \quad (9)$$

式中: D_t 为颗粒间切向变形量; V_t 为粒子间的切向相对速度。根据 Hertz 接触模型, k_t 与 c_t 可推导为

$$k_t = r k_n \quad (10)$$

r 为比例系数

$$\begin{cases} r = \frac{1 - V_i}{1 - 0.5 V_i}, & \text{P-P} \\ r = \frac{(1 - V_i) / G_i + (1 - V_j) / G_j}{(1 - 0.5 V_i) / G_i + (1 - 0.5 V_j) / G_j}, & \text{P-D} \end{cases} \quad (11)$$

$$c_t = 2 \sqrt{mk_t} \quad (12)$$

式中: m 为接触单元等效质量; G 为接触单元的切变模量。

颗粒阻尼的耗能包括碰撞耗能和摩擦耗能。当任意两个颗粒 i, j 发生碰撞接触时,碰撞耗能表示为

$$\Delta E_m = \frac{m_i m_j (1 - e^2)}{2(m_i + m_j)} |\Delta v|^2 \quad (13)$$

式中: e 为颗粒的恢复系数; Δv 为两颗粒碰撞前的相对速度。

摩擦力做功决定了摩擦耗能的大小,表示为

$$\Delta E_n = \mu F_n \Delta S \quad (14)$$

式中: μ 为两颗粒之间的摩擦因素; ΔS 为两颗粒切向相对位移。

颗粒系统的总体能耗可表示为

$$E = \sum \Delta E_m + \sum \Delta E_n \quad (15)$$

3 PCB 阻尼器参数的确定

3.1 颗粒粒径的选择

为了使 PCB 上模态敏感点处的阻尼器具有更高效的减振能力,针对阻尼器的粒径进行探索优化,图 12 为仿真模型。在阻尼器填充空间有限的情况下,优选比重较大的颗粒,因此本文以钨合金为材料,泊松比为 0.28,密度为 $1.935 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $3.24 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。

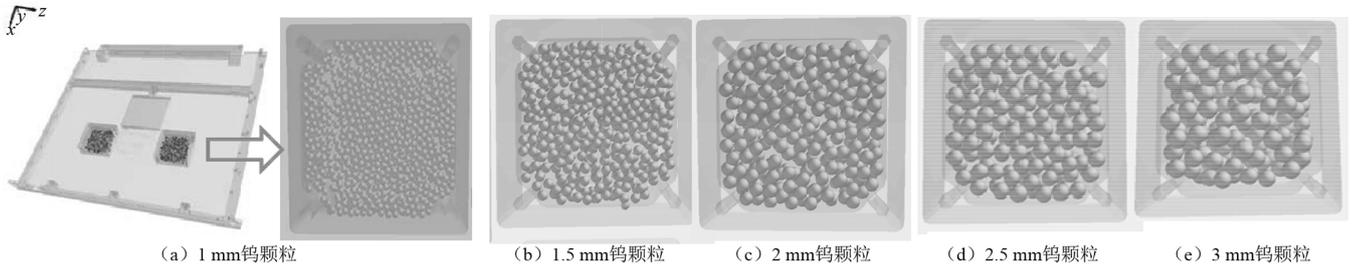


图 12 颗粒模型样图

Fig. 12 Particle model figure

如图 13 通过离散元方法分别统计不同颗粒尺寸不同时刻的耗能效果。表 2 为 1 s 内颗粒总能量耗散情况。经过粗选的颗粒尺寸,从图表中易得 2 mm 的钨合金颗粒耗散能量最大。但随着颗粒尺寸的增大能耗有所下降,后文将通过试验进行进一步探究。

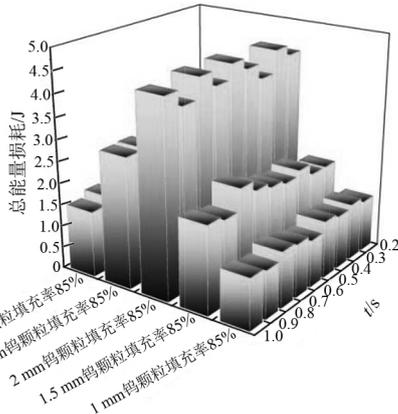


图 13 不同时刻的耗能图

Fig. 13 Different time diagram of energy loss

表 2 颗粒的总能耗

Tab. 2 Total energy loss of particles

颗粒尺寸/mm	总能量损耗/J
1.0 mm 钨颗粒	10.952
1.5 mm 钨颗粒	18.272
2.0 mm 钨颗粒	38.222
2.5 mm 钨颗粒	27.258
3.0 mm 钨颗粒	15.132

3.1.2 颗粒的细优化

基于粗选的颗粒尺寸,2 mm 颗粒的耗能效果显著。为此,以 2 mm 尺寸为界,进一步探索细微尺寸的耗能效果。细选粒径为 1.8 mm,1.9 mm,2 mm,2.1 mm,2.2 mm,填充率为 85%,参数设置不变。如图

3.1.1 颗粒的粗优化

颗粒过小,则颗粒越接近于流体的形态,失去了固态的特性,如果颗粒过大,颗粒间隙过大,碰撞次数较少。本文粗选颗粒粒径为 1 mm,1.5 mm,2 mm,2.5 mm,3 mm,填充率 85% 为例。在离散元软件中导入模型,添加颗粒的生成界面,给予模型为 X 轴的振动 5 mm,频率设置为 181 Hz 的正弦运动。基于仿真效率与速度,仿真时间设置为 1 s。

14 通过离散元方法分别统计细微颗粒尺寸的耗能效果,能得到不同时刻的能量耗散情况。表 3 则为 1 s 内的颗粒总能量耗散情况。经过细选的颗粒尺寸,从图表中易得 1.9 mm 的钨颗粒耗散能量最大。因此,细选 1.9 mm 的钨颗粒具有最佳减振效果。

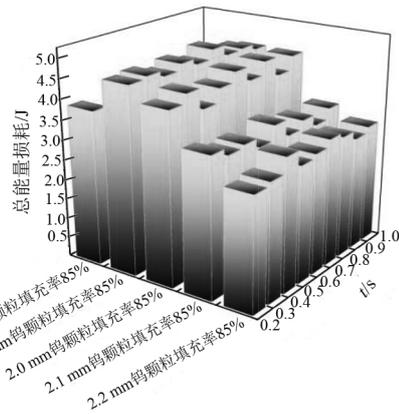


图 14 不同时刻颗粒的耗能图

Fig. 14 Different time diagram of energy loss

表 3 颗粒的总能耗

Tab. 3 Total energy loss of particles

颗粒尺寸/mm	总能量损耗/J
1.8 mm 钨颗粒	34.241
1.9 mm 钨颗粒	41.917
2.0 mm 钨颗粒	38.222
2.1 mm 钨颗粒	29.558
2.2 mm 钨颗粒	27.332

3.2 颗粒填充率的优化

在离散元软件中导入模型,设置相同的参数与运动情况。阻尼颗粒需要保证在有限空间内能够有一定的运动行程,这样才能增大颗粒与颗粒之间摩擦与碰撞的机会,如图 15 所示,本文以填充率为 75%,80%,

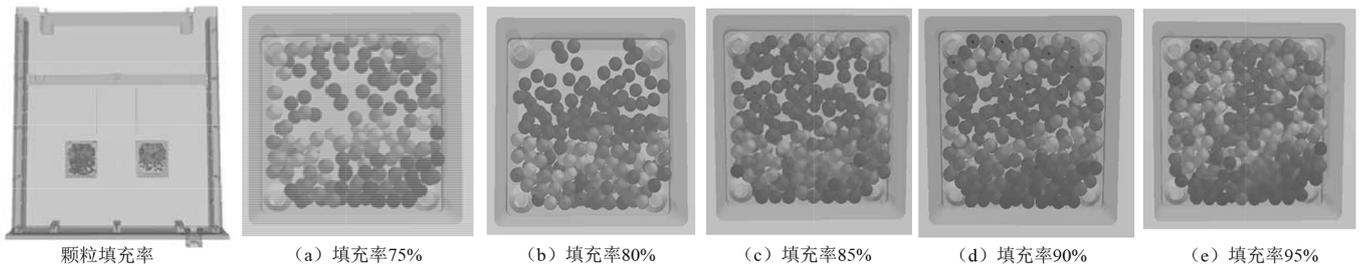


图 15 填充率模型样图

Fig. 15 Fill rate model figure

85% 90% 95% 为方案, 1.9 mm 钨合金材料颗粒为例, 进行仿真计算。

不同深浅的颗粒表示了不同的运动速度, 颜色越深, 颗粒速度越大。如图 16 所示, 通过离散元方法分别统计不同填充率颗粒阻尼器不同时刻的能量损耗。表 4 则为不同填充率下颗粒的总能耗。根据能量损失图表易得随着颗粒填充率的不断提高, 颗粒阻尼效果越明显, 90% 填充率的钨合金颗粒耗散能量最大。但是当颗粒填充率到达 95% 时, 耗能情况有显著的下降。

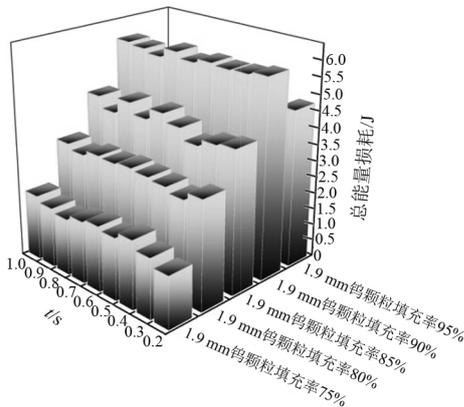


图 16 不同时刻耗能图

Fig. 16 Different time diagram of energy loss

表 4 颗粒的总能耗

Tab. 4 Total energy loss of particles

颗粒填充率/%	总能量损耗/J
钨颗粒填充率 75%	16.741
钨颗粒填充率 80%	29.017
钨颗粒填充率 85%	41.917
钨颗粒填充率 90%	52.958
钨颗粒填充率 95%	42.432

3.3 颗粒尺寸与填充率的关联

上文对颗粒尺寸的优化和颗粒填充率的优化是分开进行的, 为了验证二者之间的关联性, 寻求最佳的适配值, 做出如下仿真。仿真参数与过程与前文相同, 颗粒尺寸以 1.5 mm, 1.8 mm, 1.9 mm, 2 mm, 2.5 mm, 填充率以 80%, 85%, 90%, 95% 为方案。不同粒径对应不同填充率的耗能情况, 如图 17 所示。

不同的粒径有最佳的填充率, 1.5 mm 粒径最佳填充率为 85%, 1.8 mm, 1.9 mm, 2 mm, 2.5 mm 最佳填充

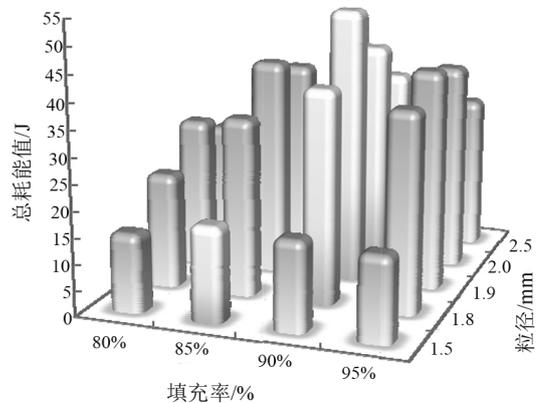


图 17 总耗能

Fig. 17 Total energy loss

率为 90%。当选择 1.9 mm 粒径, 填充率为 90% 时, 它的总能耗值是最高的。因此, 对于本文而言, 当颗粒直径为 1.9 mm 时, 其所对应的最佳适配填充率为 90%。

3.4 仿真结论

基于钨颗粒的离散元分析, 分别从颗粒的尺寸大小、填充率以及二者的关联性进行仿真优化。验证了阻尼器参数在钨颗粒粒径大小为 1.9 mm, 填充率为 90% 时能使 PCB 达到最优化的减振效率, 确定最优阻尼的配置设计方案为下一步电路的设计奠定基础。

4 试验验证

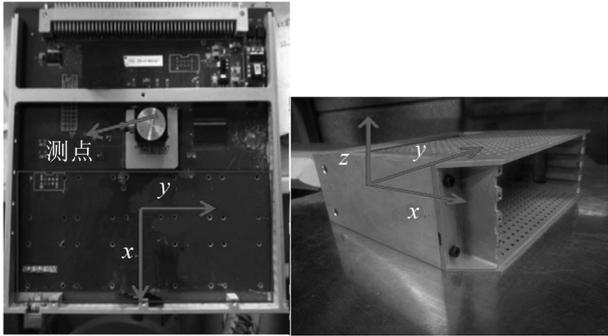
针对北京华航无线电测量研究所某 PCB, 设计制造样机, 试验用壳体、试验用阻尼器外壳, 选择测点, 进行颗粒粒径、填充率的试验验证。

PCB 结构尺寸为 192 × 179 × 2 (mm), PCB 材料为 FR-4, 重量为 226 × 10⁻³ kg, 用加速度传感器实测 PCB 在正弦振动时的均方根值, 规定 PCB 的整体方位与测点如图 18 (a) 所示。由于 PCB 上已经布满了现有电路, 增加阻尼器不能对电路造成破坏, 为此, 增加阻尼器位置为无电子线路的空白 PCB 部分。

PCB 的外层壳体如图 18 (b) 所示, 图上所示的三个方位与 PCB 的方位相匹配, 从而实现完美的对接。阻尼器采用厚度为 1.0 mm 的铝板进行封闭, 重量达到 15 × 10⁻³ kg (包括紧固件), 加工实物图如图 19 所示。在振动台上 (见图 20), 长箭头的表示振动台的主振方

向,平行于长箭头的短箭头为 PCB 的 X 方向,图示为 PCB 主振 X 的方向。

基于动力学分析,对 PCB 的减振,将重点关注二阶模态固有频率,为了达到消减峰值的目的,阻尼器将安装于二阶模态振型处。



(a) 测点 (b) 壳体
图 18 电路板与分机壳体
Fig. 18 Circuit board and extension housing

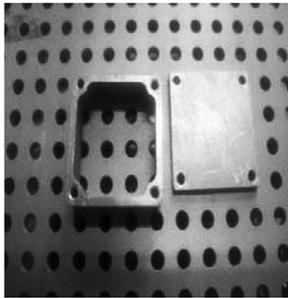


图 19 阻尼器实物图
Fig. 19 Damper physical figure

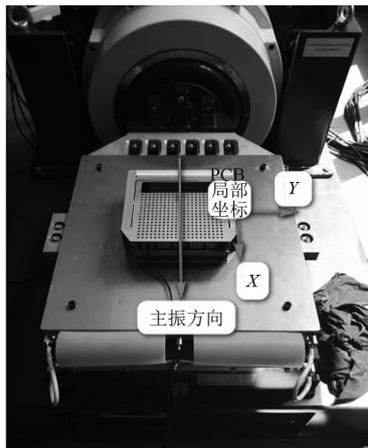


图 20 主振 X 方向
Fig. 20 The main vibration direction of X

4.1 颗粒粒径的验证

PCB 通过夹具固定在振动台上,实测样机在正弦振动下的响应,设置参数为沿主振 X 方向振动 5 mm,设置频率为 181 Hz。探索不同颗粒直径对减振效果的影响,以 1 mm,1.5 mm,1.9 mm,2.5 mm,3 mm 颗粒尺寸,填充率为 85% 为例,采用图 21 的布置方案,颗粒尺寸如图 22 所示,所得加速度均方根值如表 5 所示。

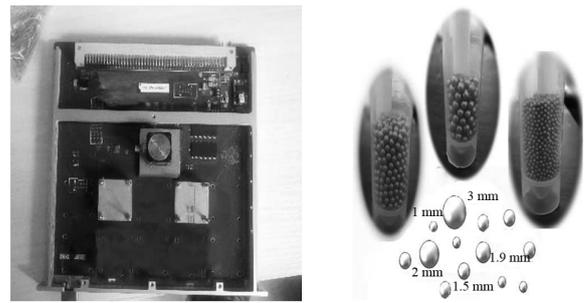


图 21 排布方案 图 22 颗粒尺寸
Fig. 21 Arrangement plan Fig. 22 Particle size

表 5 测点加速度均方根值
Tab. 5 Measured point acceleration RMS

试验方案	主振 X 方向/ (mm · s ⁻²)	Y 方向/ (mm · s ⁻²)	Z 方向/ (mm · s ⁻²)
无阻尼	44.72	31.82	23.74
钨基合金 1 mm	34.68	15.77	17.02
减振效果	22.45%	50.44%	28.31%
钨基合金 1.5 mm	26.78	13.95	14.56
减振效果	40.12%	56.16%	38.67%
钨基合金 1.9 mm	21.54	17.67	15.42
减振效果	51.83%	44.47%	35.05%
钨基合金 2.5 mm	23.62	11.67	12.8
减振效果	47.18%	63.32%	46.08%
钨基合金 3 mm	32.12	14.26	15.98
减振效果	28.18%	55.19%	32.69%

由表 5 的数据可明显得出,在颗粒的主振方向上,直径为 1.9 mm 的钨颗粒减振效果优于其他粒径的钨颗粒。减振效果在主振方向上可以达到 50% 以上,将试验结果与仿真结论进行对比。如图 23 所示,两条曲线具有高度的相似性,均证明了对于本文的 PCB,1.9 mm 尺寸的钨颗粒具有较好的减振效果。

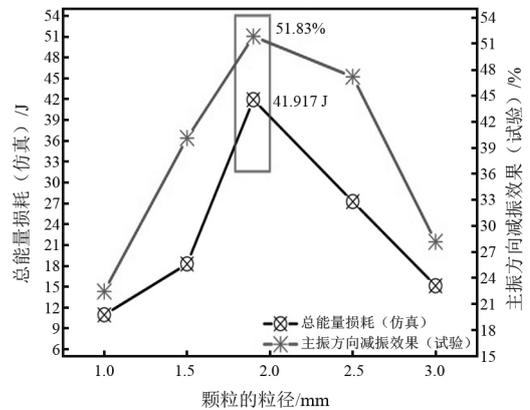


图 23 试验与仿真对比图
Fig. 23 Comparison of test and simulation

4.2 颗粒填充率的验证

PCB 通过夹具固定在振动台上,实测样机在正弦振动下的响应。探索不同填充率对减振效果的影响,以 1.9 mm 钨颗粒,75% 80% 85% 90% 95% 填充率

为例,采用图 21 的布置方案,所测得加速度均方根值如表 6 所示。

表 6 测点加速度均方根值

Tab. 6 Measured point acceleration RMS

填充率	主振 X 方向/ (mm · s ⁻²)	Y 方向/ (mm · s ⁻²)	Z 方向/ (mm · s ⁻²)
无阻尼	68.34	22.44	26.53
钨基合金 75%	53.79	16.85	22.17
减振效果	21.30%	25.91%	16.43%
钨基合金 80%	50.16	15.93	20.74
减振效果	26.60%	29.01%	21.82%
钨基合金 85%	47.81	14.98	18.46
减振效果	30.04%	33.24%	30.42%
钨基合金 90%	30.47	12.84	14.76
减振效果	55.41%	42.78%	44.36%
钨基合金 95%	35.76	13.37	20.26
减振效果	47.67%	41.42%	23.63%

从颗粒的填充率上来看,90%填充率的钨颗粒减振效果优于其他填充率的钨颗粒。试验中减振效果在主振方向上可以达到50%以上,效果十分明显。将试验结果与仿真结论进行对比,如图24均证明了对于本文的PCB,90%钨颗粒填充率具有较好的减振效果。

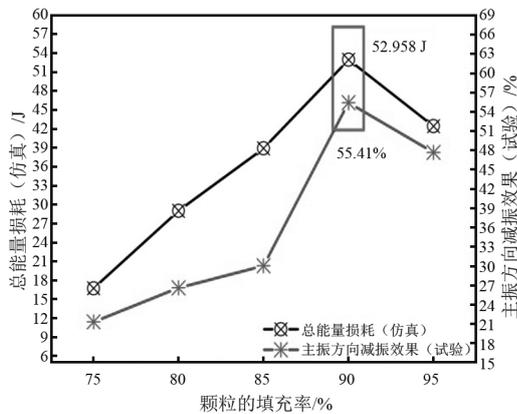


图 24 试验与仿真对比图

Fig. 24 Comparison of test and simulation

4.3 阻尼器安装位置的验证

基于有限元动力学分析,在二阶模态固有频率为181 Hz时,振动峰值达到最大点。对于本文的PCB,基于原有电路的设计,在接线与元器件排布位置的基础上,只留下图25中非敏感位置。

针对电路板进行扫频分析,扫频范围为0~330 Hz,通过频谱图验证PCB上敏感区域与非敏感区域加阻尼器的减振效果。如图26所示,图26(a)为非敏感区域电路板安装阻尼器的方案,图26(b)为敏感区域电路板安装阻尼器的方案。

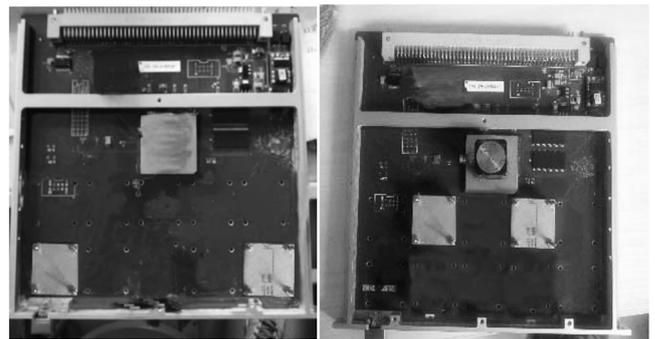
对比试验结果,通过频域曲线进行分析,如图27所示,在非敏感区域安装颗粒阻尼器后,总有效值从40.75 mm/s²降到了39.33 mm/s²,没有明显的减振效果。

在敏感区域加上阻尼器后,总有效值从40.75 mm/s²降到了20.50 mm/s²,降幅在主振方向上可以达到50%。二阶频率的峰值从27.35 mm/s²降到了15.80 mm/s²,达到很好的降峰效果,整体减振效果十分显著。



图 25 电路板的非敏感区域

Fig. 25 Non-sensitive area of the circuit board



(a) 方案一 (b) 方案二

图 26 阻尼器安装位置

Fig. 26 Damper installation position

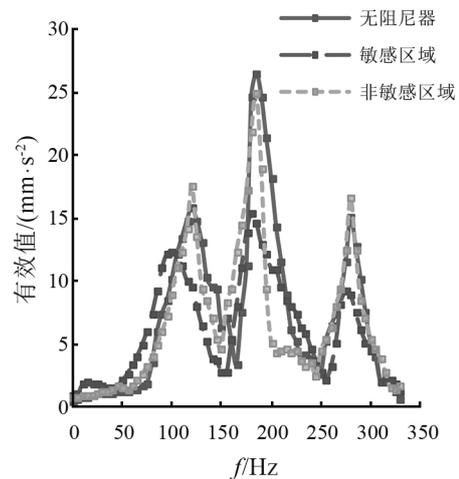


图 27 频谱图

Fig. 27 Spectrogram

5 结论

(1) 针对目前PCB结构及振动条件,在阻尼器形状的选择上,需考虑有效空间的最大利用率,并通过敏感点的位置合理的设计阻尼器。在颗粒阻尼参数的选择上,采用钨基合金颗粒,理论直径为1.9 mm,填充率为90%时,电路板达到最优化的减振效果。

(2) 基于动力学特性分析寻求模态敏感区域,通过阻尼器安装位置的选择,验证在敏感区域安装阻尼器能使 PCB 在主振方向上达到 50% 减振效率。

(3) 本文提出 PCB 的动力学分析与电路联合设计方法,改善了 PCB 的抗振特性。基于布线合理性、布通率与电气性,调整元器件位置与接线布置使得在电路板模态敏感点区域留出余裕。在非敏感区域设计电路,在敏感区域安装颗粒阻尼器。针对颗粒阻尼器模型设计与构建,完成整个电路体系的设计,大大提升了导弹电子设备的稳定性。

参考文献

- [1] 李朝旭. 电子设备的抗振动设计[J]. 电子机械工程, 2002 (1): 51-55.
LI Chaoux. Vibration resistance design of electronic equipment [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2002(1): 51-55.
- [2] PARK S, SHAH C, KWAK J, et al. Transient dynamic simulation and full-field test validation for a slim-PCB of mobile phone under drop impact [C]//Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference. Reno IEEE, 2007.
- [3] 郭宝亭, 朱梓根, 崔荣繁, 等. 金属橡胶材料的理论模型研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 314-319.
GUO Baoting, ZHU Zigen, CUI Rongfan, et al. Theoretical model of metal-rubber [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 314-319.
- [4] 马玉宏, 李艳敏, 赵桂峰, 等. 基于热老化作用的橡胶隔震支座力学性能时变规律研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 38-44.
MA Yuhong, LI Yanmin, ZHAO Guifeng, et al. Research on the time-dependent law of mechanical properties for the rubber isolation bearings based on thermal aging effect [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 38-44.
- [5] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. II: verification of theory [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (12): 1450-1461.
- [6] LU Z, LU X L, MASRI S F. Studies of the performance of particle dampers under dynamic loads [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(26): 5415-5433.
- [7] MA J J, ZHANG D H, WU B H, et al. Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(4): 1074-1083.
- [8] SHAH B M, PILLET D, BAI X M, et al. Construction and characterization of a particle-based thrust damping system [J]. Journal of Sound & Vibration, 2016, 326(3): 489-502.
- [9] CUI Z Y, WU J H, CHEN H L, et al. A quantitative analysis on the energy dissipation mechanism of the non-obstructive particle damping technology [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(11): 2449-2456.
- [10] XIAO W Q, HUANG Y X, JIANG H, et al. Effect of powder material on vibration reduction of gear system in centrifugal field [J]. Powder Technology, 2016, 294: 146-158.
- [11] NAYERI R D, MASRI S F, CAFFREY J P. Studies of the performance of multi-unit impact dampers under stochastic excitation [J]. Journal of Vibration and Acoustics-Transactions of the ASME, 2007, 129(2): 239-251.
- [12] LU Z, MASRI S F, LUX L. Studies of the performance of particle dampers attached to a two-degrees-of-freedom system under random excitation [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(10): 1454-1471.
- [13] 肖望强, 黄玉祥, 李威, 等. 颗粒阻尼器配置对齿轮传动系统动特性影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 1-12.
XIAO Wangqiang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Influence of particle damper configurations on the dynamic characteristic for gear transmission system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 1-12.
- [14] BAI X M, SHAH B, KEER L M, et al. Particle dynamics simulations of a piston-based particle damper [J]. Powder Technology, 2009, 189(1): 115-125.
- [15] VEERAMUTHUVEL P, SHANKAR K, SAIRAJAN K K. Application of particle damper on electronic packages for spacecraft [J]. Acta Astronautica, 2016, 127: 260-270.
- [16] 陈康, 张雷, 胡晓吉. 基于模态分析的印制电路板抗振优化设计[J]. 计算机与现代化, 2014(1): 214-218.
CHEN Kang, ZHANG Lei, HU Xiaoji. Anti-vibration optimization design of printed circuit board based on modal analysis [J]. Computer and Modernization, 2014(1): 214-218.
- [17] 叶先磊, 王建军, 朱梓根. 大小叶盘结构连续参数模型和振动模态[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 66-72.
YE Xianlei, WANG Jianjun, ZHU Zigen, et al. Continuous parameter model and vibration modal of sputter vane rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 66-72.
- [18] FOWLER B L, FLINT E M, OLSON S E. Design methodology for particle damping [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4331: 186-197.
- [19] 苏凡, 张航, 尹忠俊. 颗粒物质流变学行为和材料参数对颗粒阻尼器能量耗散的影响[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 238-244.
SU Fan, ZHANG Hang, YIN Zhongjun. Effects of rheology behaviour and material parameters of granular material on energy dissipation of a particle damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 238-244.
- [20] 闫维明, 张向东, 黄韵文, 等. 基于颗粒阻尼技术的结构减振控制[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(9): 1317-1320.
YAN Weiming, ZHANG Xiangdong, HUANG Yunwen, et al. Structure vibration control based on particle damping technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(9): 1317-1320.
- [21] XIAO W Q, CHEN Z W, PAN T L, et al. Research on the impact of surface properties of particle on damping effect in gear transmission under high speed and heavy load [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 1116-1131.