

某机载电子设备抗振加固优化设计

黄 巍, 李 理, 秦小晋

(中国电子科技集团第三十研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 机载产品安装环境中, 振动条件严苛, 是造成电子设备失效的重要原因, 本文分析某机载产品的失效现象, 对故障机理进行了探究, 利用有限元仿真模拟手段验证了机理分析的假设, 通过抗振加固措施改进了机载产品薄弱环节的抗振性能, 并通过仿真手段验证了优化抗振设计的有效性, 经过了实践验证, 均再未出现故障。

关键词: 机载产品; 振动失效; 有限元仿真; 振动加固

中图分类号: TH12 **文献标识码:** A

1 引言

机载电子设备随飞机在任务剖面内经受起降、翻滚、高速巡航等带来的力学振动与冲击, 机载电子设备在满足高低温、低气压、湿热等条件的基础上, 抗振动环境适应性能成为评价其通用质量特性优劣的重要因素^[1-2]。为避免机载电子设备随飞机飞行中出现振动带来的故障, 在上机前, 依据设备安装的位置, 将经受应力筛选、功能性振动考核、耐久性振动考核等振动测试。

国内外学者对机载电子设备的抗振性能与减振措施进行大量研究, 如安装钢丝绳减振器、金属橡胶隔振器对设备进行减振, 安装阻尼或涂覆阻尼材料增加系统阻尼比, 以此来抑制振动能量放大^[3-4]; 安装吸振器, 将振动能量转移至吸振器振子上, 从而将能量耗散^[5-6]。但在一些狭小安装空间, 只能依靠设备自身性能或其他加固措施如提高自身刚度来实现对抗振能力^[8-9]。本文以某机载供电型设备的故障为例, 内部含有电感、熔断器等器件,

介绍了点胶灌封对电设备抗振性能的提升。

2 失效现象与故障定位

2.1 设备与安装方式

本文分析的机载电子设备为供电型, 整机外壳采用 5A06 铝合金铣加工成型, 如图 1 所示, 内部电源 PCB 采用螺钉紧固在机壳上, PCB 上的大型阻容器件采用镀银金属丝焊接绑扎处理, 如图 2 所示。整机两侧为安装耳, 上装楔形锁紧器与安装部位硬连接。

2.2 失效现象

本设备在应力筛选条件下, 经过 2h 振动后进行开机检测, 此时电源指示灯不亮, 电源对外无输出。打开整机盖板后, 发现熔断器已经从滤波调节 PCB 板上脱离, 掉落熔断器如图 3 所示。

2.3 故障定位

对脱离的熔断器座进行透视扫描, 如图 4 所示, 焊

丝变形但无明显裂痕，其内部熔断丝无断裂，断裂处出现在熔断器焊丝与印制板焊接处，初步判定为熔断器焊脚处在外界振动激励条件下，应力过大，从而引起熔断器整体脱离 PCB，并造成断路引发故障。

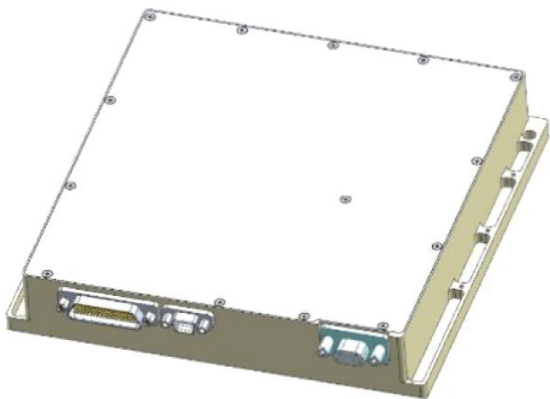


图 1 整机外形图

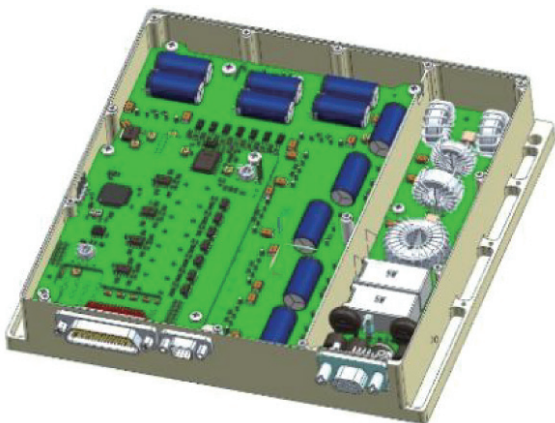


图 2 内部 PCB 安装图



图 3 脱落熔断器

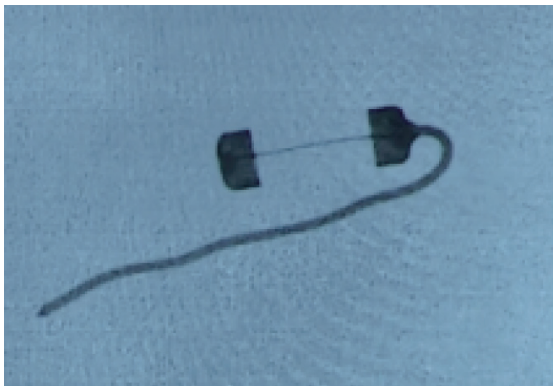


图 4 X 射线扫描图

3 失效机理分析

本次分析的机载设备 PCB 中的熔断器质量较小，在设计初期并未对其进行减振加固措施，整个熔断器质量约 1.2g，焊丝直径 0.6mm，焊丝材料为锡铅合金，熔断器参数如图 5 所示。

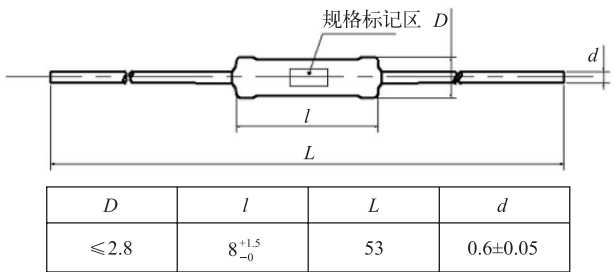


图 5 熔断器参数图

熔断器采用焊接安装方式，其焊接点位于 PCB 板安装螺钉之间，如图 6 所示。

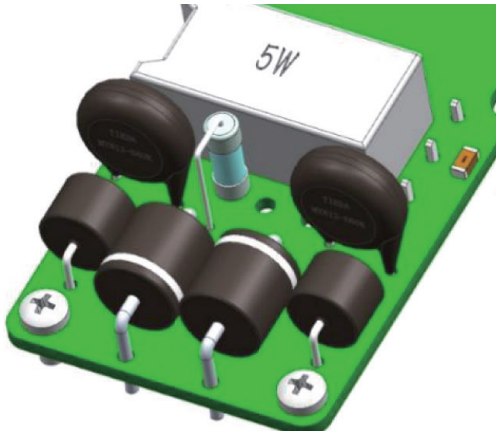


图 6 熔断器安装图

在大多数情况下，基板在低阶频率处发生基频共振最为常见，基频共振变形量大，对组件危害也最大^[7]。为快速计算 PCB 板的低阶固有频率与振型，忽略电源调节 PCB 板上小质量器件，并将较大质量器件质量赋予 PCB。

对于四边简支的 PCB 板，均有

$$W(x, y, t) = u(x, y)T(t) \quad (1)$$

$$W(x, y, t) = \sum_{m,n=1}^{\infty} \sum_{m,n=1}^{\infty} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \left[A_{mn} \cos P_{mn} t + B_{mn} \sin P_{mn} t \right] \quad (2)$$

式中， $W(x, y, t)$ 为 PCB 板上某点振动状态函数， $u(x, y)$ 为振型函数， $T(t)$ 为时间函数， A_{mn} 、 B_{mn} 为由边界条件与初始条件确定的常数。 P_{mn} 为固有频率， a 、 b 为 PCB 板外形长度尺寸与宽度尺寸， m 、 n 分别为 x 与 y 轴向的半波数。固有频率：

$$P_{mn} = \pi^2 \frac{D}{\rho} \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中， $m=1, 2, 3$ ； $n=1, 2, 3$ ； D 为刚度系数， ρ 为 PCB 密度。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)} \quad (4)$$

式中， E 为 PCB 板弹性模量， h 为 PCB 板厚度尺寸， μ 为泊松比。

PCB 板的材料参数见表 1。

表 1 PCB 材料参数表

材料	密度 / (kg/m ³)	弹性模量 / GPa	泊松比	抗拉强度 / MPa
FR-4	2.65×10^3	18.7	0.49	98

调压 PCB 板由螺钉紧固于铝合金外壳上，重点考虑安装熔断器区域由 4 颗螺钉紧固，可近似简化为两边简支固定方式，长边 $a=70\text{mm}$ ，短边 $b=55\text{mm}$ 。利用两端简支的 PCB 板其简化固有频率公式

$$P_n = \frac{\pi}{2a^2} \left(\frac{D}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

计算可得熔断器安装区域的基频固有频率为 320.56Hz。

经计算，滤波调节 PCB 板熔断器区域的一阶固有频率为 320.56Hz，而振动应力筛选条件条件如图 7 所示。

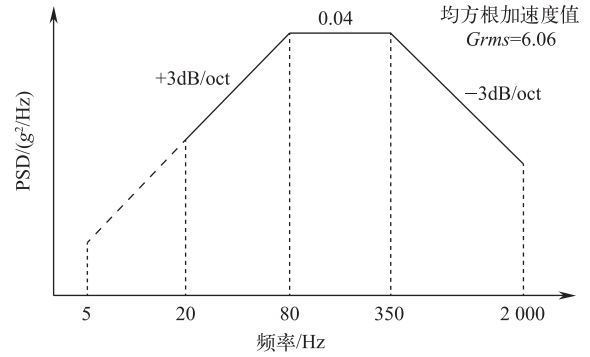


图 7 振动条件图

可见 PCB 板的固有频率处于应力筛选振动条件中功率谱密度幅值较大的频带中，因此振动条件激励会对 PCB 板产生较大的共振放大影响，进而更容易使熔断器焊接位置发生断裂。为进一步验证失效机理分析的正确性，并精确分析在振动条件下熔断器焊接处受力情况，开展仿真模拟分析。

4 仿真模拟

采用通用有限元软件 ANSYS 的 mechanical 模块对机载电子设备进行随机振动分析。

4.1 建模与材料数据

对实际物理模型进行合理的简化，平衡计算精度与计算时间成本是模型简化的关键。本次分析的机载电子设备，包含金属外壳、内部 PCB 板、PCB 板载器件。在对 PCB 板简化时，忽略质量较小的器件，以质点代替，去除模型中的圆角、微小孔洞、对整体受力较小的装饰特征，以及处于软连接连接器，以减小模型分析规模。

建立电源插件有限元模型，具体的简化方法如下：

- 1) 设备铝合金外壳和印制板主要采用实体单元和壳单元模拟；
- 2) 设备铝合金外壳与印制板之间的螺钉紧固连接采用刚性单元模拟；
- 3) 印制板上小而轻的元器件以质量点等效，仿真模型的质量分布与实际模型一致；
- 4) 设备的楔形锁紧处采用约束固定方式处理。

模型完成后，在 meshing 模块进行网格划分，如图 8 所示。

电子设备机壳为 5A06 铝合金材料，印制板为 FR-4 材料，熔断器主体为玻璃材质，两端金属与焊丝为锡铅合金，材料特性见表 2。

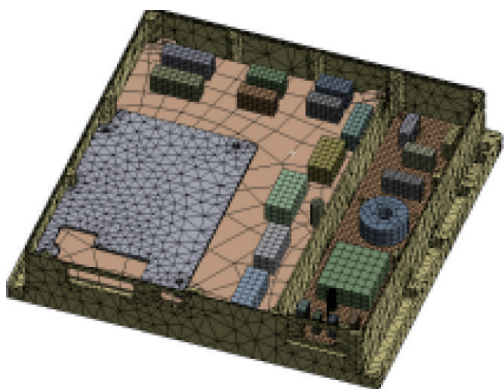


图 8 熔断器网格划分图

表 2 材料特性表

材料	密度 / (kg/m ³)	弹性模量 / GPa	泊松比	抗拉强度 / MPa
5A06	2.78×10^3	70	0.3	261
FR-4	2.65×10^3	18.7	0.49	98
玻璃	3.5×10^3	2.35	0.2	102
Sn63Pb37	8.47×10^3	43.3	0.363	29.1

4.2 仿真模拟结果与分析

依照整机固定方式，对设备进行安装耳全自由度约束边界条件的加载，并依此固定方式进行整机的模态分析，确定整机固有频率。在整机固定边界施加力学激励，首先进行模态分析，提取整机低阶固有频率，再利用模态缩减法进行谱分析，验证整机在外部力学激励条件的响应应力值是否满足设计要求。

为保证后续力学计算模态频率数值能覆盖外界加载激励频率范围，提取前 10 阶模态，通过仿真计算整机前 10 阶固有频率值见表 3，振型图如图 9 所示。

整机振动响应应力较大值主要分布于螺钉与整机固定连接处，提取熔断器结构件应力云图，最大应力为熔断器下焊接丝连接处，应力值为 26.5MPa，应力分布云图如图 10 所示。

表 3 机载电子设备固有频率表

阶次	频率值 /Hz
1	303.23
2	345.89
3	420.58
4	606.78
5	652.02
6	817.48
7	905.75
8	1 006.7
9	1 064.7
10	1 185

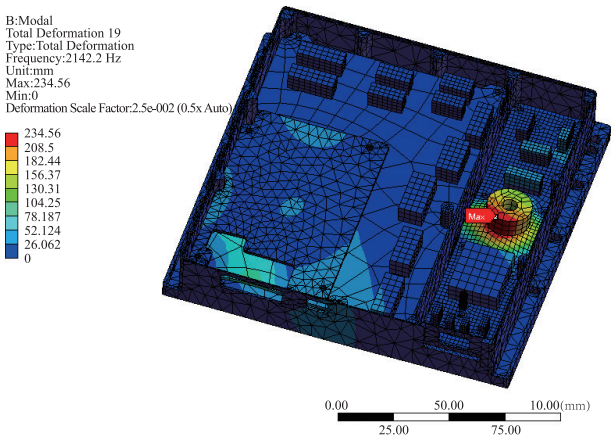
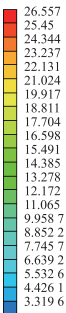
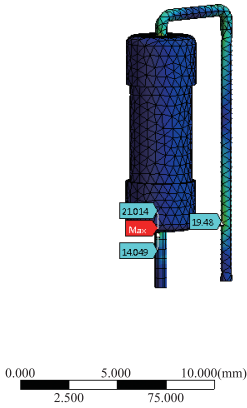


图 9 整机模态振型图

C: Random Vibration
Equivalent Stress
Type: Equivalent Stress
Scale Factor Value: 1 Sigma
Probability: 68.269%
Unit: MPa
Time: 0 s
Custom Obsolete
Max: 26.557
Min: 62.361 e-12
Deformation Scale Factor: 1 (Auto Scale)



C: Random Vibration
Equivalent Stress
Type: Equivalent Stress
Scale Factor Value: 1 Sigma
Probability: 68.269%
Unit: MPa
Time: 0 s
Custom Obsolete
Max: 26.557
Min: 62.361 e-12
Deformation Scale Factor: 1 (Auto Scale)

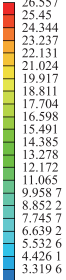
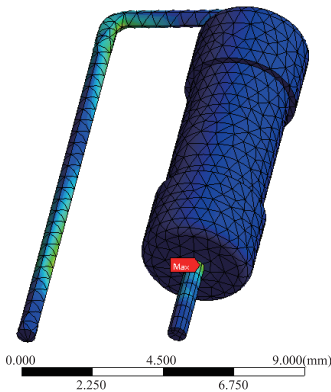


图 10 熔断器应力分布云图

5 分析与优化

5.1 仿真结果分析

依据《工业材料实用手册》焊锡 (Sn63Pb37) 屈服强度为 29.1MPa, 因此印制板关键器件许用应力值应小于 29.1MPa, 熔断器外部焊丝材料力学特性无法准确获知, 但其材料成分部分接近焊锡材料, 因此熔断器焊丝许用应力以 $\leq 29.1\text{MPa}$ 为准。通过仿真结果分析, 熔断器焊丝根部的最大应力为 26.5MPa, 接近材料的最大许用应力值, 在交变应力作用下存在较大的断裂破坏风险。通过以上振动应力筛选仿真分析佐证了失效机理分析中熔断器存在较高失效风险的结论。

5.2 优化手段与措施

在无法增加减振措施的条件下, 为抵抗高强度振动, 机载电子设备元器件最常用的方式为点胶或灌封加固。通过增加器件与 PCB 板之间的接触面积, 从而减小峰值载荷下的应力水平, 起到振动加固的作用。对本次机载电子设备的失效熔断器位置采用 704 硅胶, 对器件进行半高度封闭加固, 起到加固固定熔断器与印制板连接的作用, 如图 11 所示。

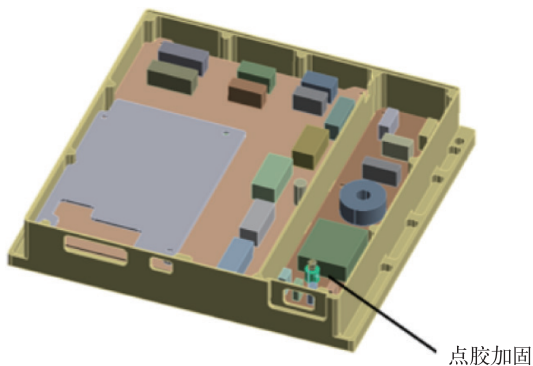


图 11 点胶加固图

5.3 优化仿真评估

机载电子设备模型其他无变化, 仅增加熔断器周围硅胶模型, 硅胶与熔断器接触面采用面-面绑定接触处理, 取硅胶硬化后的材料力学特性, 作为材料参数进行输入。加载同样的应力筛选随机振动载荷后, 提取熔断器与硅胶的有限元分析结果应力云图, 最大应力在硅胶边缘, 以及焊接丝与 PCB 板连接处, 应力值为 5.02MPa, 应力分布云图如图 12、13 所示。

由仿真结果可见, 加固优化前与优化后, 最大应力

值与位置发生改变, 经过优化熔断器附近最大应力值由 26.5MPa 下降至 5.02MPa, 见表 4, 远低于材料的许用应力, 加固措施有效。通过增加打胶加固措施, 该电子设备后续应力筛选试验中均顺利通过, 未出现熔断器断裂故障。

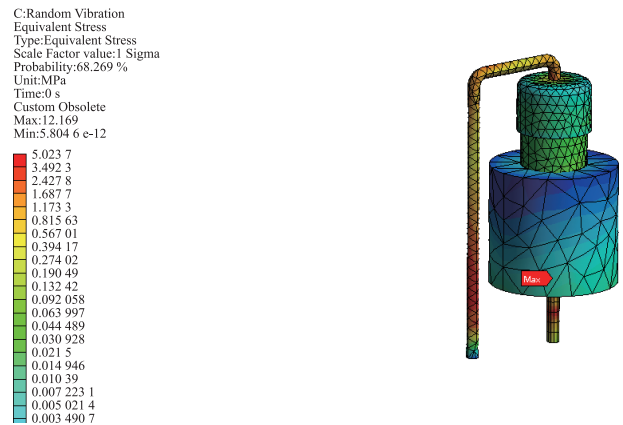


图 12 熔断器与硅胶形变分布云图

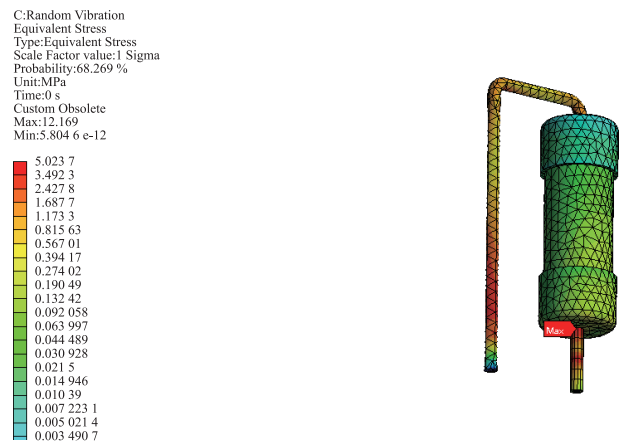


图 13 熔断器最大应力与应力分布云图

表 4 采用优化方案后的仿真计算结果

	优化前	优化后
熔断器焊丝应力极值	26.5MPa	5.02MPa
位置	焊丝根部	焊丝根部

6 结论

本次机载电子设备在设计初期, 因熔断器重量较小, 未充分考虑熔断器安装区域的基频特性, 导致其低阶模态落入外界激励的高能量频率区间, 因幅值放大, 熔断器焊丝连接处承受应力过大, 依照仿真分析结果可见,

在无硅胶加固条件下熔断器最大应力为 26.5MPa，接近材料许用应力，在长时间反复振动条件下，易产生疲劳损伤，并间接导致产品应力最大处破坏失效；在有硅胶加固状态下，熔断器最大应力为 5.02MPa，远小于材料许用应力，满足设计指标要求。

在机载产品设计阶段除质量较大或应力敏感器件需提前加固处理外，要结合数值计算、仿真分析及任务剖面振动激励条件，分析高能量重叠危险区域，进行预先加固或减振处理。

参考文献

- [1] 苏敏, 袁春花, 金世超, 等. 振动条件下频率源相位噪声恶化影响研究 [J]. 微波学报, 2017, 33 (3) : 93-96.
- [2] 季馨. 电子设备抗恶劣环境设计概论 [J]. 电子机械工程, 2004 (6) : 31-34.
- [3] 彭超, 彭灿, 于坤鹏, 等. 基于拓扑优化的某系留气

球设备挂架优化设计 [J]. 电子机械工程, 2016, 32 (5) : 34-38.

- [4] 严宏. 基于拓扑优化的某机载显控台轻量化设计 [J]. 机械与电子, 2016, 34 (11) : 22-25.
- [5] 时玉艳, 任勇生, 张玉环. 具有约束层阻尼旋转复合材料轴的动态特性研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (7) : 45-56.
- [6] 彭超, 杨静, 王志海, 等. 基于有限元法的某机载雷达频综器减振设计 [J]. 机械与电子, 2015 (9) : 44-48.
- [7] 季馨, 王树荣. 电子设备振动环境适应性设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [8] 韩钟剑, 汪婕, 赵宇博, 等. 某机载电子设备轻量化设计研究 [J]. 电子机械工程, 2024, 40 (3) : 50-54, 64.
- [9] 贾光南. 某机载电子设备减重设计及仿真分析 [J]. 舰船电子对抗, 2019, 42 (3) : 95-98, 103.

收稿日期: 2024-12-17