

## 可回收电子设备抗强冲击设计研究\*

崔冠宇<sup>1</sup>, 翟高伟<sup>1</sup>, 时洪扬<sup>1</sup>, 李 硕<sup>1</sup>, 文 艺<sup>2</sup>, 张显辉<sup>1</sup>, 王雁翔<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076

2 北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

**摘要:** 针对箭载可回收电子设备的抗强冲击设计进行了分析研究, 设备采用模块化方式方便安装和调试, 采用多种措施提升设备的抗强冲击能力: 对于设备和整流罩一起落地的情况, 采用安装脚减振防护; 对于整流罩空中解体、设备单独落地的情况, 采用包角减振防护; 为防止电源开关控制柄在强冲击下移位, 采用开关限位凸台进行限位防护; 对于印制板上的元器件, 通过缓冲胶灌封来保证元器件焊点的强度, 防止管脚断裂、焊点开裂; 采用 LED 防护罩对 LED 雾灯提供结构防护, 同时保证了 LED 雾灯的灯光能被观察到。结合力学仿真和力学试验, 有效解决了可回收电子设备抗强冲击问题。

**关键词:** 可回收; 强冲击; 力学仿真

**中图分类号:** TB122

**文献标识码:** A

**文章编号:** CN11-1780(2022)01-0041-09

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210309001

**引用格式:** 崔冠宇, 翟高伟, 时洪扬, 等. 可回收电子设备抗强冲击设计研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 41-49.

## Research on high anti-impact design of recyclable electronic equipment

CUI Guanyu<sup>1</sup>, ZHAI Gaowei<sup>1</sup>, SHI Hongyang<sup>1</sup>, LI Shuo<sup>1</sup>, WEN Yi<sup>2</sup>, ZHANG Xianhui<sup>1</sup>, WANG Yanxiang<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076;

2. Beijing Research Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076)

**Abstract:** This paper focuses on the research on high anti-impact design of recyclable electronic equipment on rocket. The modular mode is adopted to facilitate the installation and debugging of the equipment. At the same time, many measures are adopted to improve the high anti-impact ability of the equipment: for the case that the equipment and the fairing fall to the ground together, the installation foot absorption pad is used for vibration reduction protection; for the case that the fairing disintegrates in the air and the equipment falls to the ground alone, the corner absorption pad is used for vibration reduction protection; in order to prevent the power switch control handle from shifting under strong impact, the limiting pin on power switch is used for limit; for the components on the PCB, the buffer glue is used to ensure the strength of the solder joints of the components and prevent pin fracture and solder joints cracking; the LED protective cover is used to provide structural protection for the LED lamp and ensure that the light of the LED lamp can be observed outside. Combined with mechanical simulation and mechanical test, the high anti-impact problem of recyclable electronic equipment is effectively solved.

**Key words:** Recyclable; High anti-impact design; Mechanical simulation

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210309001

**Citation:** CUI Guanyu, ZHAI Gaowei, SHI Hongyang, et al. Research on high anti-impact design of recyclable electronic equipment[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 41-49.

## 引 言

目前, 火箭整流罩一般采用无控制的再入返回方式, 由于各种随机干扰的影响, 落点散布较大, 较大的落区范围将带来人员疏散和财物安全的问题。随着我国运载火箭发射任务的日益增多, 整流罩落区的安全性已经成为影响型号飞行方案及运载能力的关键因素。以某长征运载火箭为试点开展整流罩伞降

\*基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目“高速目标等离子体电磁信号多维度特征测量及通信技术研究”(6162790108)  
收稿日期: 2021-03-09 收修改稿日期: 2021-05-05

控制回收研制, 为后续火箭整流罩的重复利用打下技术基础。

有源信标机安装在整流罩上, 内置黑匣子, 可记录整流罩飞行参数。同时, 信标机含有信标天线模块、通信模块、信标发射模块及电源模块, 可通过有源信标机随时跟踪整流罩位置。整流罩在二级火箭飞行段被抛掉后, 以自由落体形式返回地面, 若降落伞打开失败, 整流罩落地冲击会达到三万倍重力加速度, 所以要求有源信标机必须满足抗三万倍重力加速度强冲击的要求。在承受强冲击条件下, 有源信标机在落地后需要正常工作, 地面搜寻人员手持检测设备能在 150 km 范围内顺利搜寻到有源信标机发射的信号, 保证有源信标机可回收。目前, 抗强冲击设计有采用阻尼材料和安装阻尼器的方法来减小结构的振动幅度<sup>[1,2]</sup>, 有采取对合组合碟簧将大部分冲击载荷作用在端盖再传递给设备<sup>[3]</sup>, 有采取限位器限制设备与安装板的相对位移幅值<sup>[4]</sup>。对于箭上产品, 空间紧凑且功能单元多, 没有放置对合组合碟簧和限位器的空间, 仅凭阻尼器无法满足设备抗三万倍重力加速度强冲击的要求。本文综合采用多种减振和缓冲方式, 满足了有源信标机抗强冲击的要求。

### 1 抗冲击能力提升措施

根据功能需求, 有源信标机需要采用集成化技术, 集成电源、遥测、信标、卫星通信及数据存储等功能, 既能通过无线电主动发送位置信息, 又能提供信标供地面设备以搜索信号强度方向的方式实现单人地面逼近定位搜寻。有源信标机设备整机如图 1 (a) 所示, 在信标机上表面放置电源开关保护盖板, 在两个侧面放置 LED 雾灯, 信标机包含的模块有: 通信模块、信标天线模块、信标发射模块、存储模块、电源模块, 如图 1 (b) 所示。

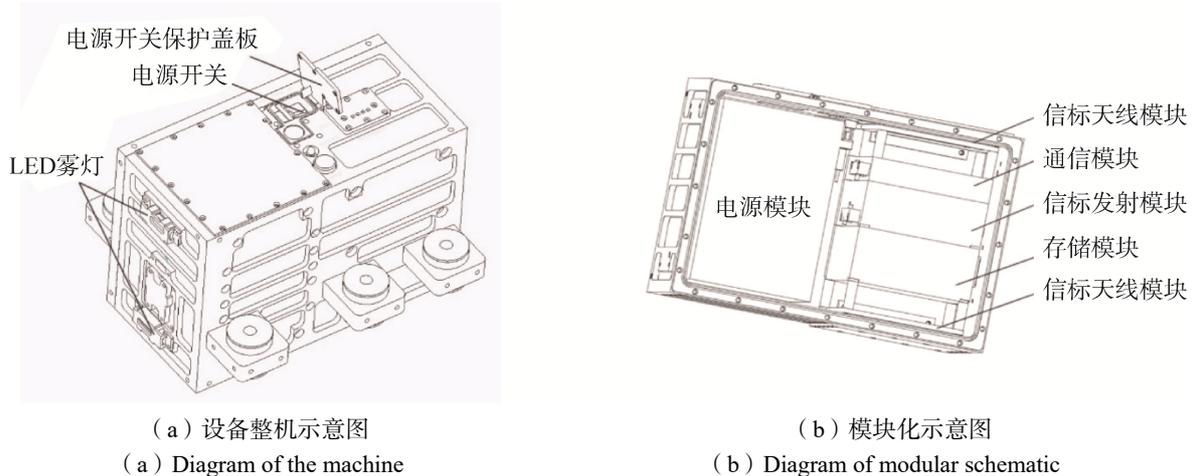


图 1 信标机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the machine

本文采用安装脚减振、包角减振、电源开关限位、缓冲胶、LED 防护罩等措施提升信标机的抗强冲击能力。

#### 1.1 采用安装脚减振

有源信标机安装在火箭整流罩上, 落地瞬间有两种可能: 一是信标机和整流罩一起落地; 二是整流罩空中解体, 信标机单独落地。针对信标机和整流罩一起落地的情况, 需要在信标机的 6 个安装脚放置减振垫。

常用的减振垫最大直径为 20 mm, 承受的最大设备重量为 7 kg。此次的有源信标机重量预计在 10 kg~13 kg 左右, 且冲击量级大, 常用减振垫的减振能力无法满足要求, 需要寻找承重更大、减振效果更好、大减振垫。经过调研, 减振垫 JZD38 的减振能力满足安装减振要求, 减振垫组成如图 2 所示, 各型号减振垫对比见表 1。

加工减振垫 JZD38, 设计配套的减振垫衬套、垫片, 组装后如图 3 所示。减振垫 JZD38 特性曲线如图 4 所示。

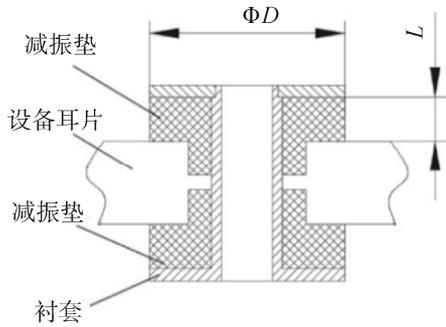


图 2 减振垫组成示意图

Fig. 2 Structural diagram of absorption pad

表 1 减振垫性能及外形对比

Table 1 Properties and shape comparison of absorption pads

| 减振垫<br>型号 | 6个减振垫可支<br>持重量 (kg) | 直径 $D$<br>(mm) | 高度 $L$<br>(mm) |
|-----------|---------------------|----------------|----------------|
| JZD11     | 3                   | 11             | 3              |
| JZD14     | 4                   | 14             | 3.5            |
| JZD20     | 7                   | 20             | 4.5            |
| JZD32     | 10                  | 32             | 8              |
| JZD38     | 13                  | 38             | 8              |



图 3 减振垫 JZD38 总装图

Fig. 3 Assembly picture of JZD38

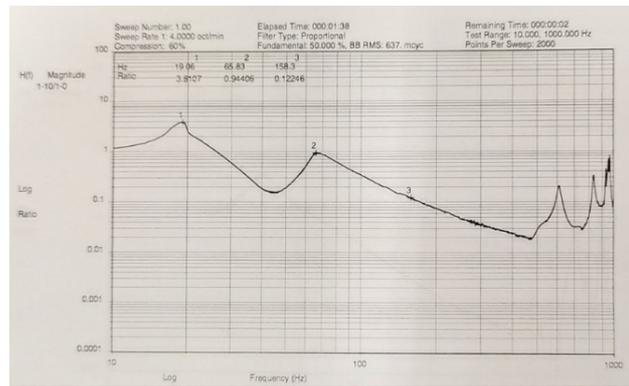


图 4 减振垫 JZD38 特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of JZD38

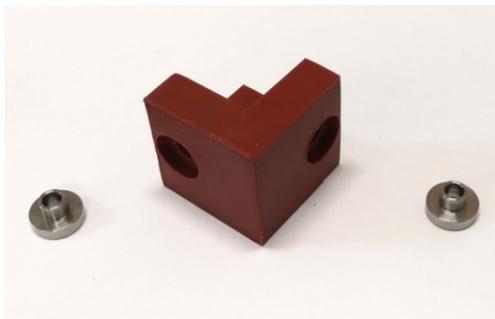
### 1.2 采用包角减振

针对整流罩空中解体、信标机单独落地的情况，需要在信标机的 6 个安装耳片和 8 个外露角放置减振包角。

包角减振器根据有源信标机的安装耳片尺寸和外露角尺寸开模具加工，胶料与 JZD38 一致。根据包角减振器的尺寸设计固定减振器的衬套，构成如图 5 所示，总装后如图 6 所示。

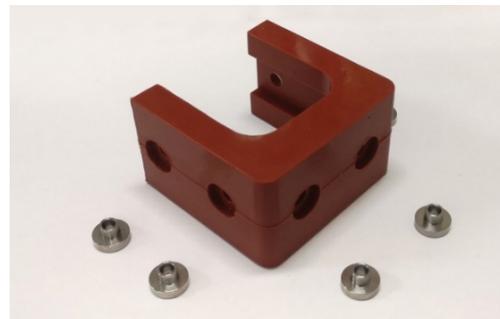
### 1.3 电源开关限位

有源信标机为保证落地后能持续向外发送信号，内置了可充电电源。在信标机顶面装有电源开关保护盖板，如图 1 (a) 所示。打开电源开关保护盖板，可以操作电源开关。



(a) 四角包角减振器组成

(a) Composition diagram of four corner



(b) 安装耳片包角减振器组成

(b) Composition diagram of mounting feet

图 5 包角减振器组成图

Fig. 5 Composition diagram of corner absorption pad



(a) 四角包角减振器  
(a) Absorption pad for four corner

(b) 安装耳片包角减振器  
(b) Absorption pad for mounting feet

图 6 包角减振器总装图

Fig. 6 Assembly pictures of corner absorption pad

在火箭发射前, 需要打开电源开关保护盖板, 将电源开关从“关”拨向“开”, 电源开始工作。电源开关为弹簧结构, 在有源信标机落地瞬间, 巨大的冲击力有可能将电源开关的控制柄从“开”一侧振到“关”, 电源关闭, 导致有源信标机无法向外发送信标信号, 地面设备无法定位搜寻, 因此需要设计限位结构保证钮子开关正常工作。

在电源开关保护盖板上进行结构设计改进, 增加限位凸台, 如图 7 所示。



(a) 限位凸台示意图  
(a) Diagram of the limiting pin

(b) 限位凸台实物图  
(b) Machining picture of the limiting pin

图 7 增加限位凸台

Fig. 7 Add limiting boss

增加限位凸台后, 在电源开关保护盖板打开时, 电源钮子开关可以在“开”、“关”间双向拨动, 但在电源开关保护盖板合上后, 限位凸台挡住了钮子开关的移动, 电源开关只能定位在“开”或者“关”的某一侧。即使有源信标机落地瞬间受到的冲击力较大, 电源开关也不会由于外力振到“关”的一侧, 保证了电源持续工作。

#### 1.4 缓冲胶对元器件防护

在有源信标机受到强冲击的情况下, 最薄弱的地方是电子元器件。元器件容易在强冲击下产生管脚断裂、焊点开裂等情况, 一旦焊点和管脚接触不实, 设备的电性能将无法保证。

元器件焊装到印制板上, 调试完毕后, 在元器件外面灌一层缓冲胶, 待胶液固化后, 胶液和元器件结合成一个整体, 提升了元器件的抗冲击能力。但印制板缓冲胶的使用要考虑两方面: 一是有些缓冲胶需要先加热熔化后再灌封固化, 一旦加热温度过高, 会损伤元器件性能; 二是有些缓冲胶在固化时, 有一个体积收缩的过程, 产生的收缩应力有可能会损伤元器件, 造成焊点或者管脚损伤。经过调研, 采用了缓冲胶 HCJ1, 该缓冲胶缓冲能力较强, 融化温度为 45 °C, 低于元器件使用温度, 同时该缓冲胶固化时变形较小, 不会对元器件管脚、焊点造成损伤。

对单模块进行灌胶，包括模块正反面，胶液距离模块顶部 1 mm~3 mm，高于需要保护的元器件。灌胶后如图 8 所示。



图 8 模块灌胶

Fig. 8 Pictures of module gluing

测试各模块电性能，一切正常后将各模块组装。

### 1.5 LED 防护罩

为保证落地后被地面人员快速搜寻回收，有源信标机需配备 LED 雾灯。LED 雾灯在强冲击下需要保持正常工作，优先选择抗冲击的柔性 LED 灯带，如图 9 所示。柔性 LED 灯带的优点是抗外界冲击强，同时还可以裁剪成 25 mm 长的灯段，每段独立可亮，如图 10 所示。



图 9 柔性 LED 灯带

Fig. 9 Flexible LED strip

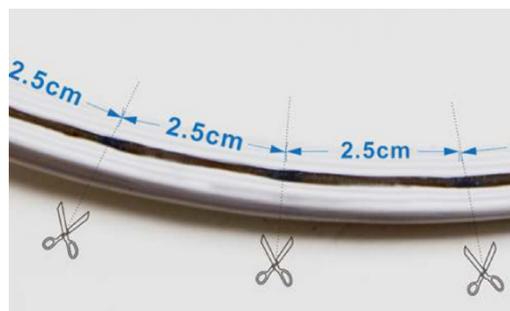


图 10 LED 灯带裁剪示意图

Fig. 10 Diagram of LED strip cutting

在有源信标机的外侧，安装了 4 个 LED，LED 闪光可提醒搜寻人员，以便搜寻。LED 雾灯在有源信标机落地瞬间有被撞击损坏的风险。为保证 LED 雾灯正常工作，需要对其增加柔性胶套和防护罩。防护罩不仅要给 LED 雾灯提供结构防护，还要在防护的同时保证 LED 雾灯的灯光能被外面观察到。LED 雾灯防护措施如图 11、图 12 所示。将柔性 LED 灯带安装到有源信标机后，实物如图 13 所示。



图 11 LED 灯带用胶套防护

Fig. 11 LED strip is protected by rubber sleeve

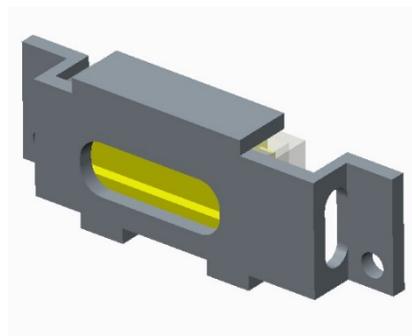


图 12 胶套外安装 LED 防护罩

Fig. 12 Installation of LED protective cover

## 2 力学仿真分析

通过力学仿真分析, 可以提前发现存在的问题, 早发现早解决。利用力学仿真分析软件对有源信标机进行冲击仿真分析<sup>[5,6]</sup>。

印制板 PCB 和结构壳体的材料视为线性, 壳体材料为硬铝 2A12, 印制板材料为环氧酚醛层压玻璃布板 3240, 衬套为不锈钢 1Cr17Ni2, 其材料特性见表 2。



图 13 固定 LED 灯带  
Fig. 13 Fixed LED strip

表 2 材料特性对比

| Table 2 Comparison of material properties |                         |                      |      |
|---|-------------------------|----------------------|------|
| 材料  | 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量 (Pa)            | 泊松比  |
| 硬铝 2A12                                   | 2 800                   | 7.1×10 <sup>10</sup> | 0.3  |
| PCB (FR-4)                                | 1 800                   | 8.5×10 <sup>9</sup>  | 0.31 |
| 橡胶  | 1 080                   | 1.25×10 <sup>6</sup> | 0.45 |
| 不锈钢                                       | 7 800                   | 2.1×10 <sup>11</sup> | 0.3  |

冲击响应分析用于评估设备在瞬时载荷下产生的响应。对冲击试验进行分析仿真, 冲击波形如图 14 所示。

对单机分别加载  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向冲击载荷, 仿真分析单机应力分布, 分为信标机和整流罩一起落地、信标机单独落地两种情况进行分析。

### 2.1 信标机与整流罩一起落地

信标机和整流罩一起落地, 安装脚减振垫发挥作用, 设备应力分布云图如图 15~图 17 所示。

单机的冲击应力最大发生在  $z$  方向, 最大应力为 44.21 MPa。

冲击的安全裕度  $MS$  计算 (取安全系数  $f=1.35$ ) :

$$MS = \frac{[\sigma]}{\sigma_{MAX} \cdot f} - 1 = \frac{400}{44.21 \times 1.35} - 1 = 3.5 > 0$$

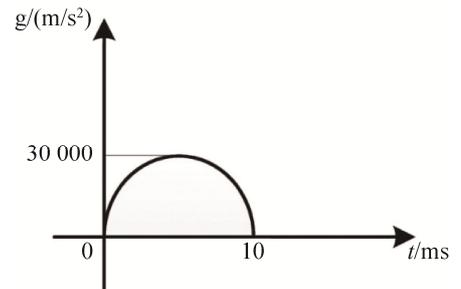


图 14 冲击试验曲线  
Fig. 14 Curve of impact test

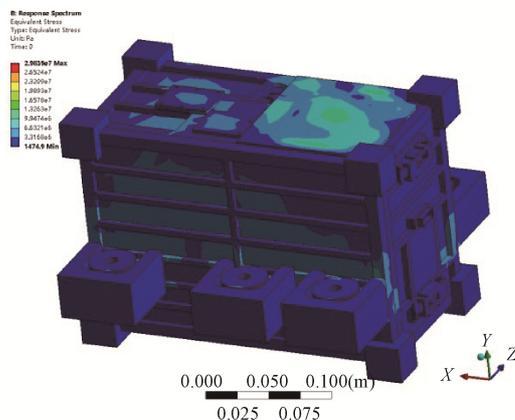


图 15  $x$  方向应力分布  
Fig. 15 Stress diagram of  $x$ -direction

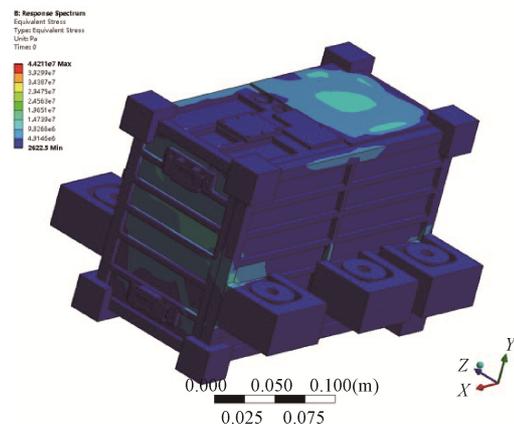


图 16  $y$  方向应力分布  
Fig. 16 Stress diagram of  $y$ -direction

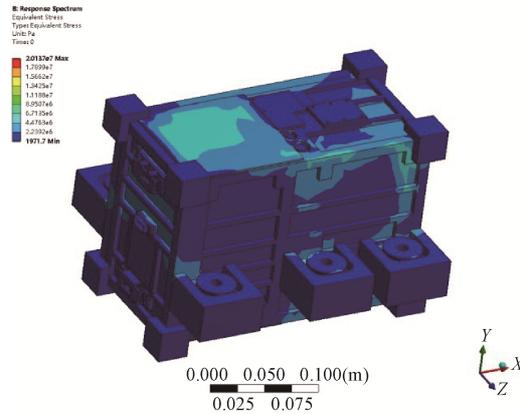


图 17 z 方向应力分布

Fig. 17 Stress diagram of z-direction

## 2.2 信标机单独落地

信标机单独落地，包角减振垫发挥作用，设备应力分布云图如图 18~图 20 所示。

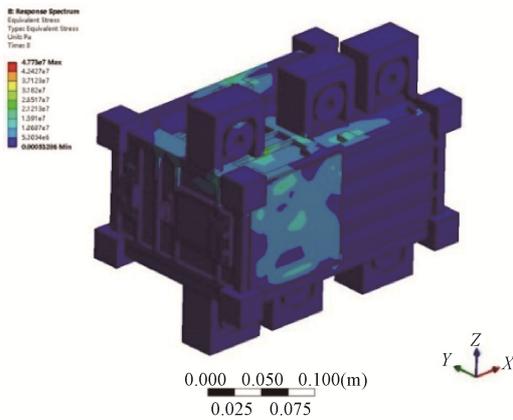


图 18 x 方向应力图

Fig. 18 Stress diagram of x-direction

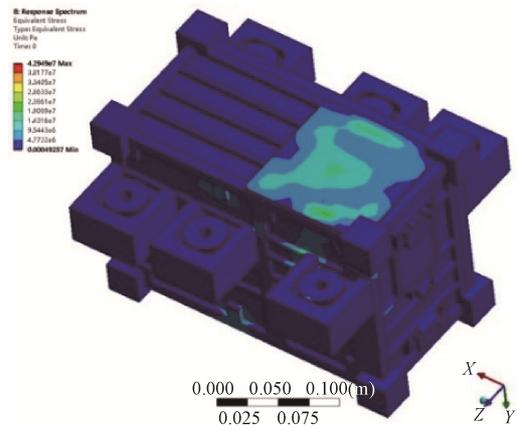


图 19 y 方向应力分布

Fig. 19 Stress diagram of y-direction

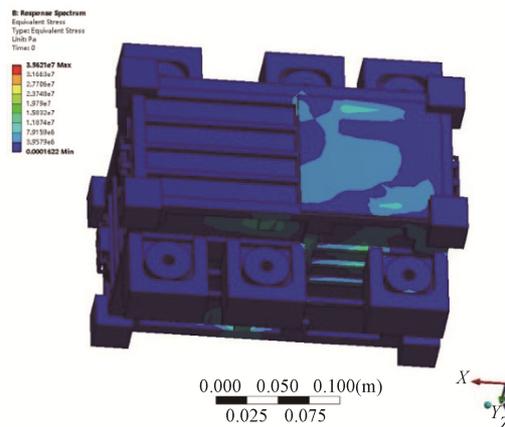


图 20 z 方向应力分布

Fig. 20 Stress diagram of z-direction

单机的冲击应力最大发生在 z 方向，最大应力为 47.73 MPa。

冲击的安全裕度 MS 计算（取安全系数  $f=1.35$ ）：

$$MS = \frac{[\sigma]}{\sigma_{MAX} \cdot f} - 1 = \frac{400}{47.73 \times 1.35} - 1 = 3.17 > 0$$

经过仿真分析两种情况, 冲击的安全裕度都大于零, 单机满足冲击试验条件, 说明安装脚减振垫和包角减振垫满足要求。

### 3 试验验证

有源信标机调试后, 通过力学试验验证设备的抗冲击能力, 分为随机振动试验和搭载飞行试验。

#### 3.1 随机振动试验

根据总体提供的随机振动试验条件开展试验, 试验现场如图 21 所示。

在有源信标机的试验工装上固定传感器, 通过传感器反馈的信号确认试验台的振动量级, 保证振动量级与总体要求一致。



(a) y 方向  
(a) y direction



(b) x 方向  
(b) x direction



(c) z 方向  
(c) z direction

图 21 力学试验  
Fig. 21 Mechanical test

试验后对有源信标机进行电性能测试, 指标正常, 满足要求。

#### 3.2 搭载飞行试验

开展搭载飞行试验, 验证有源信标机的抗冲击能力。

将有源信标机固定于某运载火箭的整流罩上, 在火箭发射后 4 个小时内, 通过有源信标机的遥测数据信号及信标信号, 地面搜寻人员顺利确定准确落点, 有源信标机成功回收, 如图 22 所示。

搜索到有源信标机后, 检查发现电源模块、信标天线模块、通信模块、存储模块、信标发射模块均正常工作, 之后成功读取了全程飞行遥测参数, 顺利完成了飞行验证任务。



图 22 设备成功回收  
Fig. 22 Recycling successful

## 4 结束语

通过安装脚减振、包角减振,降低了有源信标机所承受的冲击量级;通过给电源开关保护盖板增加限位凸台的方法,保证了在有源信标机受到强冲击时,电源开关不会自动关闭;通过使用缓冲胶,对设备元器件起到防护作用;通过设计安装LED防护罩,保证了LED雾灯在受到强冲击时不仅能正常工作,LED灯光也能被观察到。通过力学仿真分析和飞行试验,验证了对有源信标机的抗冲击设计可以抗三万倍重力加速度的强冲击,措施有效。

## 参考文献

- [1] 王明旭. 复杂结构的阻尼减振理论及设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [2] 张建斌. 带橡胶减振器的箭载电子设备动力学响应分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 程远, 方晓强, 郑文鹏. 一种可抗强冲击的无刷直流电动机的结构设计[J]. 微特电机, 2015, 43(5): 50–52.  
CHENG Yuan, FANG Xiaoqiang, ZHENG Wenpeng. Structure design of brushless DC motors with strong anti-impact capability[J]. Micro and Special Motor, 2015, 43(5): 50–52.
- [4] 杨勇. 一种新型限位器的强冲击响应分析[J]. 装备制造技术, 2018(12): 27–31.  
YANG Yong. High shock response analysis of a novel displacement restrictor[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(12): 27–31.
- [5] 张遵鸥, 沈巍巍. 舰船电子设备抗强冲击设计探讨[J]. 电子机械工程, 2015(2): 7–9.  
ZHANG Zunou, SHEN Weiwei. Discussion on high anti-shock design of naval electronic equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015(2): 7–9.
- [6] 高剑虹. 减振橡胶支座的非线性有限元分析[D]. 福州: 福州大学, 2006.

## [作者简介]

- 崔冠宇 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空用电子测控设备研制工作。  
翟高伟 1986年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空用电子测控设备研制工作。  
时洪扬 1991年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空用电子测控设备研制工作。  
李 硕 1993年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空用电子测控设备研制工作。  
文 艺 1990年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间飞行器电气系统综合设计。  
张显辉 1976年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空用电子测控设备研制工作。  
王雁翔 1983年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为超宽带功放与信号设备研制。

(本文编辑: 杨秀丽)