

# 电池安装支架的约束阻尼处理

黄加才 李晓颜 王建月 赵云峰 陈江涛

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 某产品的电池在地面试验中由于振动响应过大而出现故障。本文采用有限元分析的方法对电池支架进行约束阻尼处理的优化设计,并进行试验验证。结果表明,采用约束阻尼技术后,电池的功率谱密度共振峰值放大倍数由未处理前的 28 倍下降到 14 倍,电池故障完全排除,验证了约束阻尼减振技术对此类板和薄壳等结构进行减振的有效性。

**关键词** 有限元,电池支架,约束阻尼,减振

## Constrained Damping Treatment of Battery Bracket

Huang Jiakai Li Xiaoyan Wang Jianyue Zhao Yunfeng Chen Jiangtao

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Battery failed to work through vibration test as the response exceeded its tolerance. By FEM method, constrained damping technology was optimized to redesign the battery bracket, and then tests were performed. Results show that the battery's times of resonance apex of power spectrum density dropped from 28 to 14 after bracket was treated by constrained damping layer, and the battery worked successfully, indicating the efficiency of constrained damping technology when used to isolate vibration for structures such as board and shell.

**Key words** FEM, Battery bracket, Constrained damping, Isolate vibration

### 0 引言

结构的约束阻尼处理是在结构表面应变较大的位置粘贴高阻尼附加层,然后再粘接一层约束层,通过高阻尼层的变形来消耗振动能量。其显著特点是对结构的模态频率和振型影响较小,特别适合结构的事后修改,主要用于梁、板和薄壳等结构的弯曲振动减振<sup>[1]</sup>。

某产品的电池及其安装支架示意图如图 1 所示。在进行动态力学环境试验时,电池垂向功率谱密度共振峰值的放大倍数高达 28 倍,严重影响电池的正常供电,需要对其进行减振。由于安装支架为薄板结构,电池正好安装在其响应最大的中心位置,需在电池和安装支架之间进行隔振,或降低支架自身的响应。受限于安装尺寸和结构尺寸,传统的在电池和支架间安装隔振器方法,以及对安装支架进行刚化的方法都不能进行有效减振。因此,决定对电池安装支架采取约束阻尼技术进行处理。

本文采用有限元分析方法,对电池支架的约束阻尼处理进行优化设计,并进行了试验验证。

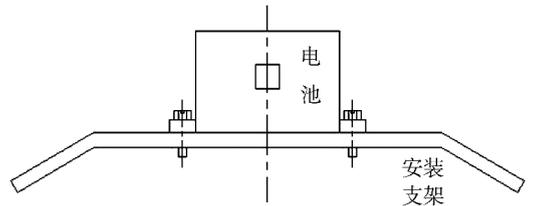


图 1 电池及其安装支架示意图

Fig 1 Sketch of battery and bracket

### 1 约束阻尼处理的有限元分析

大型通用软件 MSC. NASTRAN 系统在分析约束阻尼结构时,基层和约束层及中间的阻尼层均可采用三维实体单元 HEXA,每个单元 8 个节点,每个节点有 3 个平移自由度,由于基层、约束层、阻尼层位移函数完全相同,因而在整个界面上位移具有较好的协调性,计算精度较高<sup>[2]</sup>。本文采用 MSC. NASTRAN 软件进行支架约束阻尼处理的有限元分析。

#### 1.1 安装支架的模态分析

整个支架均采用六面体单元,由于电池刚度较大,故采用集中质量代替,即在电池质心处建立一个

收稿日期:2012-11-05

作者简介:黄加才,1977 年出生,高级工程师,主要从事阻尼减振技术的研究。E-mail:Jiacaiah@163.com

0 维质量单元,然后通过多点约束(MPC)与支架相连。整个模型共有 2 728 个节点,1 894 个单元。

支架两端用螺栓与其他安装板连接,边界条件为将电池支架上螺栓连接处相应节点的三个方向上的自由度全部约束。有限元模型见图 2,分析中支架的材料为铝合金,其弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>。复模态分析前三阶振型如图 3 所示。

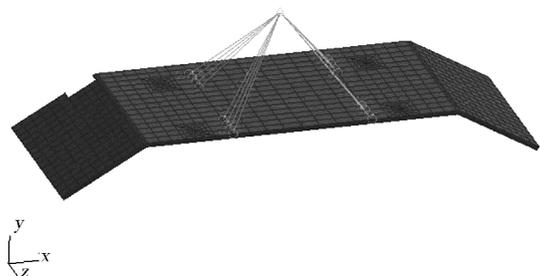
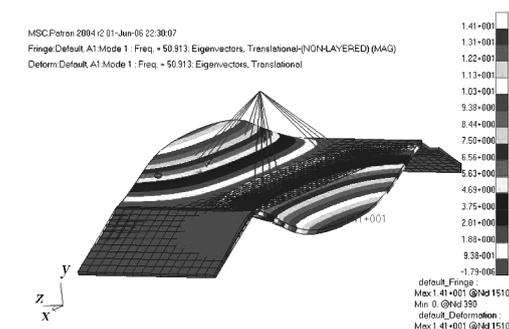
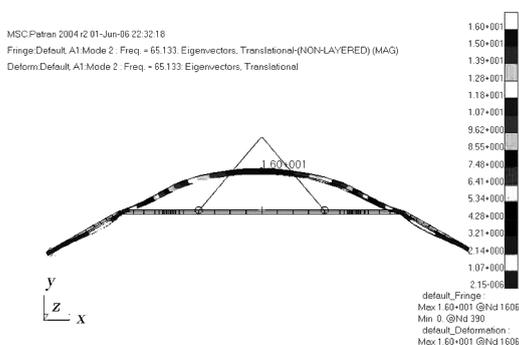


图 2 电池及支架有限元模型

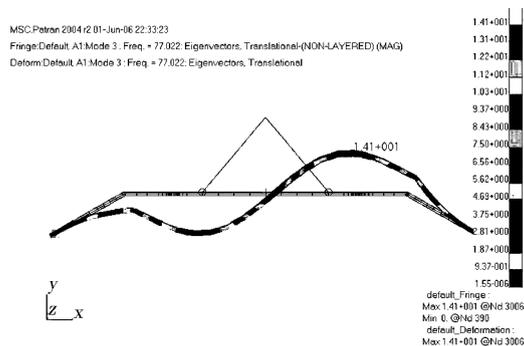
Fig. 2 Finite element model of battery and bracket



(a) 一阶模态振型



(b) 二阶模态振型



(c) 三阶模态振型

图 3 支架前三阶模态振型图

Fig. 3 First three modes of bracket

可以看出,安装支架的前三阶模态振型均为弯曲变形。因此,对支架进行约束阻尼处理能够有效增加前三阶模态的模态阻尼比,抑制电池的共振峰值,有效降低电池上的动态响应。

## 1.2 约束阻尼处理支架有限元分析

约束阻尼处理的效果受阻尼层的粘贴位置、厚度、材料及约束层的材料、厚度等因素的影响,为了取得更好的减振效果,需对这些影响因素进行优化分析,设计一个最优处理方案。

### 1.2.1 阻尼层粘贴位置优化分析

在结构应变较大的位置粘贴阻尼层,其减振效果更加明显。从模态分析结果可知,由于支架的中间位置(电池安装位置)为一阶模态和三阶模态的节点,振幅较小,而二阶模态的振幅较大,且弯曲方向是电池工作环境的主方向,对电池影响最大,因而主要降低二阶模态的共振峰值。

图 4 给出了支架的二阶振型对应的应变云图。

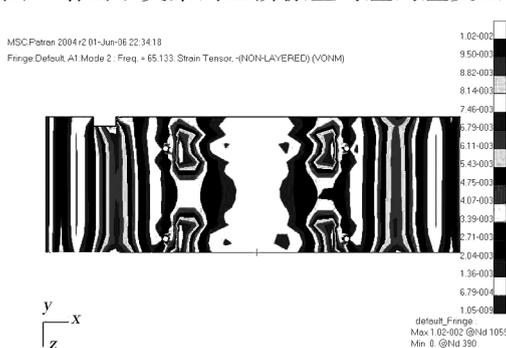


图 4 二阶模态振型对应的应变图

Fig. 4 Strain corresponding to second mode

可以看出:支架与电池连接处的应变最大,其他地方的应变也较大,基本上在同一数量级上。同时考虑到工艺的因素,决定对整个板面全部实施约束阻尼处理。

### 1.2.2 阻尼层厚度优化分析

航天材料及工艺研究所研制的 ZN-1 阻尼材料,阻尼系数达 1.5 左右,与铝合金接触时不产生腐蚀,老化性能优异,特别适用于用作约束阻尼处理的阻尼夹芯层。当它用作阻尼夹芯层时,可用模具直接硫化成所需厚度和形状的阻尼板,也可用硫化好的符合厚度要求的阻尼板<sup>[3-4]</sup>。因此,阻尼芯层材料选用 ZN-1 阻尼材料。约束层材料选为不锈钢。材料性能见表 1。

在分析约束阻尼结构时,基层和约束层及中间的阻尼层均可采用三维实体单元,由于三层的位移函数完全相同,因而在整个界面上位移具有较好的协调性,计算精度较高。支架、阻尼层和约束层均用六面体单元,电池采用集中质量,通过多点约束(MPC)与支架相连。

约束层的刚度和基层刚度基本一致时减振效果最明显,该支架为4 mm厚的铝合金板,相对应约束层钢板厚度为1 mm。阻尼层取0.5 mm(方案一)和1 mm(方案二)两种方案进行分析。

表1 材料性能

Tab. 1 Material properties

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	阻尼系数
不锈钢	$2.3 \times 10^5$	0.3	7.8	-
ZN-1	4.62	0.499	0.001	1.05

在建立有限元模型时,阻尼层与支架基体、阻尼层与约束层之间用消除重复节点的方法来模拟它们之间的粘接,位移边界条件与上文所述未采用约束阻尼处理支架的相同。整个模型共有4 546个节点,4 006个单元,采用约束阻尼处理后支架的局部有限元模型如图5所示。

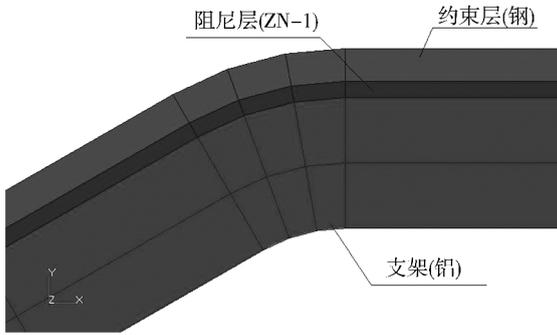


图5 阻尼处理后支架局部有限元模型

Fig. 5 Local finite element model of bracket after damping treatment

采用约束阻尼层处理后,支架的前三阶模态振型与未做约束阻尼处理的情况相似,说明约束阻尼层处理不改变结构的模态振型。支架的模态频率及结构阻尼系数如表2所示。

可以看出,经方案一进行阻尼处理的结构阻尼系数较高,故采用此方案进行约束阻尼处理。

表2 复特征值分析结果

Tab. 2 Results of complex eigenvalue analysis

模态	方案一		方案二	
	频率/Hz	结构阻尼系数	频率/Hz	结构阻尼系数
1	52.1	0.203	51.07	0.177
2	58.7	0.255	56.69	0.220
3	84.7	0.208	83.09	0.187

根据上述分析结果,可以确定约束阻尼处理的方案为:阻尼层采用厚度为0.5 mm的ZN-1阻尼胶膜,

约束层采用厚度为1 mm的不锈钢板。

### 1.2.3 约束阻尼处理后减振效果的数值分析

对约束阻尼处理方案进行频率响应分析。有限元模型与复特征值分析相同,不同的是边界条件的设置,需要放开螺栓连接处相应节点竖直方向上的约束,然后对节点在此方向上施加单位加速度载荷<sup>[5]</sup>,计算该方向上电池的响应。

根据频率响应分析结果,单位加速度经支架传递到电池后,其竖直方向放大倍数如图6所示。

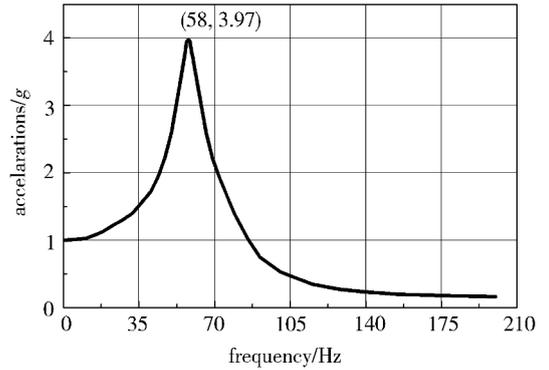


图6 频率响应分析结果

Fig. 6 Result of frequency response analysis

由上图可知,支架经约束阻尼处理后,电池在共振峰处的加速度放大倍数为3.97倍。由于功率谱密度放大倍数为加速度放大倍数的平方,因此对支架进行约束阻尼处理后,电池的功率谱密度放大倍数不超过16倍。

## 2 试验验证

按照有限元数值分析确定的方案,采用厚度为0.5 mm的ZN-1阻尼层和厚度为1 mm的不锈钢板约束层,对电池支架进行了约束阻尼处理。然后进行随机振动力学环境试验,其中频率为20到2 000 Hz,功率谱密度为 $0.02 g^2/Hz$ ,测点取电池竖直方向顶部的中心点,电池竖直方向的随机振动试验曲线如图7所示。

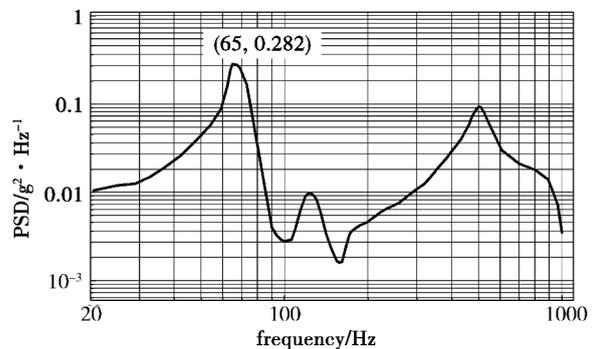


图7 电池支架振动试验曲线图(竖直方向)

Fig. 7 Vibration test result of bracket

可以看出,支架经约束阻尼处理后,电池共振峰

处的功率谱密度为  $0.28 \text{ g}^2/\text{Hz}$ , 与输入的功率谱密度相比, 其共振峰处的功率谱密度放大倍数为 14 倍左右, 验证了有限元数值分析结果的有效性。与支架约束阻尼处理前(28 倍)相比, 电池共振峰处的功率谱密度放大倍数减小了近 50%, 有效地降低了电池上的响应, 满足其使用环境要求。

### 3 结论

(1) 对电池安装支架采用约束阻尼处理, 电池共振峰处的功率谱密度放大倍数由 28 倍降至 14 倍左右, 有效降低了电池上的响应, 满足其使用环境要求。

(2) 有限元数值分析结果与试验结果比较接近, 验证了该方法的有效性, 为今后类似结构进行约束阻

尼处理时提供了优化设计的经验。

### 参考文献

- [1] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1983: 88-133
- [2] 隋允康, 杜家政, 彭细荣. MSC. Nastran 有限元动力分析与优化设计实用教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 10-80
- [3] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(5): 1-5
- [4] 赵云峰. ZN 系列粘弹性阻尼材料的性能及应用[J]. 宇航材料工艺, 2001, 41(2): 19-23
- [5] 马爱军, 周传月, 王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 5-75

(编辑 吴坚)

---

(上接第 34 页)

[4] 窦静之. 作用于车身的约束阻尼板的振动分析[J]. 价值工程, 2011(17): 41

[5] Ross D, Ungar E E, Kerwin E M. Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminate[C]. New York: ASME Annual Meeting Structural Damping, 1959: 49-88

[6] Mead D J, Markus S. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1965(10): 163-175

[7] 李映辉, 林松, 高庆. 约束阻尼板优化设计方法[J]. 重庆工学院学报, 2007(1): 1-6

[8] 李恩奇, 雷勇军, 唐国金, 等. 基于传递函数方法的约束层阻尼梁动力学分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 75-78

[9] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 105-123

(编辑 吴坚)