

# 基于优化的蜂窝板有限元模型修正

孔宪仁<sup>1</sup>, 秦玉灵<sup>1</sup>, 罗文波<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 哈尔滨 150001; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 蜂窝板具有较高的比强度和比刚度, 在航空航天领域得到广泛应用。用三明治等效方法计算蜂窝板等效材料参数, 在 MSC.Patran 中建立有限元模型计算蜂窝板基频, 通过分析设计变量和目标函数在 NASTRAN 中对蜂窝板基频进行优化, 利用优化结果确定等效剪切弹性模量计算公式中修正系数  $\gamma$  并重新计算修正后模型基频, 以试验所测基频值为标准对蜂窝板有限元模型进行修正。修正后模型计算基频值与实测值之间的偏差明显减小, 证实了模型修正的有效性。

**关键词:** 蜂窝板; 三明治等效方法; 模型修正; 设计变量; 目标函数

**中图分类号:** V414.1; O242.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2010)02-0227-04

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.02.021

## 1 前言

近几十年来, 在卫星结构中, 蜂窝夹层板已成为主要的承力结构<sup>[1]</sup>。该结构由两块高强度薄表层和中间的夹芯层组成: 表层通常采用高强度铝合金板或碳纤维涂上新型环保粘合剂以提高其耐火、耐腐蚀及抗紫外线能力; 夹层根据需要可以采用不同形状的铝蜂窝芯, 其中正六边形蜂窝芯用料省、制造简单、结构效率高, 应用最广。蜂窝夹层结构具有重量轻, 强度高, 刚性好, 隔音、隔热, 寿命长, 综合功能突出等特点。

蜂窝板是一种结构型材料, 建立有限元模型并进行有限元计算时, 无法直接给定其物理参数, 因此蜂窝结构有限元建模及分析无法直接进行, 只能采取等效理论计算<sup>[2]</sup>。

本文用三明治等效方法得到了蜂窝板的等效材料参数, 在 MSC.Patran 中建立蜂窝板的有限元模型, 计算出蜂窝板基频并以试验所测基频值为标准, 对蜂窝板有限元模型进行修正。通过分析设计变量和选取目标函数, 建立了蜂窝板的优化模型并在 Nastran 中对蜂窝板的基频进行优化, 利用优化结果讨论等效剪切弹性模量计算公式中修正系数  $\gamma$  的取值。修正后模型计算基频值与实测值之间的偏差明显减小, 证实了模型修正的有效性。

## 2 蜂窝板三明治理论等效计算

对含有蜂窝夹层板的复杂结构进行分析时, 由于 NASTRAN 等通用有限元程序中没有蜂窝结构单元, 只能采用特殊的方式进行, 例如采用三维有限元方法或是采用层板单元进行近似分析。采用三维有限元方法的缺点是计算量巨大, 对于一个复杂结构进行分析时, 采用此方法得不偿失。此外, 现有的层板单元也不能很好地近似蜂窝夹层板。另外, 通过试验的方法测定各种蜂窝夹层结构, 得到刚度矩阵, 然后编制各种蜂窝板的材料单元库, 再与通用有限元程序进行接轨, 这种方法的难点是需要对各种类型的蜂窝板进行测定, 由于蜂窝板的制造成本非常高, 所以这种方法也很不易实现。鉴于上述各种方法在实际应用起来都存在难度, 多年来人们极力追求等效方法, 即先在理论上找出蜂窝夹层结构的等效力学模型, 实际分析时用等效力学模型代替原来结构<sup>[3]</sup>。

对于正六边形蜂窝板, 目前有 3 种常用的等效方法, 即三明治夹芯板理论、蜂窝板理论以及等效板理论<sup>[4]</sup>。等效板理论最容易实现, 但是它无法反映蜂窝夹芯形状的影响; 蜂窝板理论计算量相对较大, 而且计算中需要用到三明治夹芯板理论的结果, 在实际应用中不是很方便; 三明治夹芯板理论计算工作量不大, 容易实现。在早期的蜂窝夹层结

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-10-10

作者简介: 孔宪仁 (1961-), 男, 博士学位, 教授, 博士生导师, 主要研究卫星结构动力学、热力学等。秦玉灵 (1982-), 女, 博士研究生, 研究方向为卫星结构动力学及模型修正。E-mail: erica2004ren@163.com。

构分析模型中,为了简化分析,蜂窝芯层的面内刚度和弯曲刚度通常被忽略。事实上,虽然蜂窝芯层很软,但由于它相对蒙皮而言具有较大的厚度,忽略面内刚度和弯曲刚度会导致不可忽视的偏差。

三明治夹芯板理论是对蜂窝夹芯进行等效的一种有效方法,假定芯层能抵抗横向剪切变形并且具有一定的面内刚度,上下蒙皮层服从 Kirchhoff 假设,忽略其抵抗横向剪应力的能力,则蜂窝芯层可以等效为一均质的厚度不变的正交异性层<sup>[5]</sup>。正六边形蜂窝的胞元示意图如图 1 所示,其等效弹性参数为

$$E_x = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad E_y = \frac{4}{\sqrt{3}} E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3$$

$$\mu_x = 1 - 4 \frac{t^2}{l^2} \quad \mu_y = 1 - \frac{8t^2}{3l^2}$$

$$G_{xy} = \frac{\sqrt{3}t^3}{2l^3} E_s \quad G_{xz} = G_{yz} = \frac{\gamma t}{\sqrt{3}l} E_s$$

式中:  $x$ 、 $y$  表示板平面上两正交方向,  $z$  表示垂直于板面方向;  $E_s$  为夹芯材料的工程常数;  $\mu$  为泊松比;  $l$ 、 $t$  分别为蜂窝胞元壁板的长度和厚度;  $\gamma$  为修正系数,取决于工艺,一般取 0.4~0.6 之间,理论值取 1。

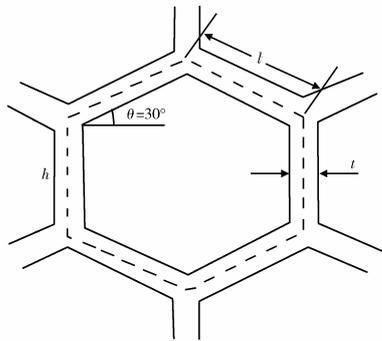


图 1 正六边形蜂窝胞元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hexagon honeycomb

### 3 蜂窝板有限元模型修正

由于等效计算出来的物理参数值跟实际值有一定偏差,因此有限元计算的结果跟实际结果也不一致,可以利用试验测得的结果来修正等效参数值,使得有限元计算结果尽量与试验结果相一致,这个过程就是有限元模型修正。

#### 3.1 蜂窝板有限元模型的建立

蜂窝板长 500 mm,宽 50 mm,上下表层厚度相等都为  $d=0.3$  mm,蜂窝芯的高度为  $2H=29.4$  mm,夹

芯为正六边形铝蜂窝,材料为铝,弹性模量为  $E_s=68$  GPa,泊松比  $\mu=0.3$ ,蜂窝结构如图 1 所示,其中:边长  $l=4$  mm,壁厚  $t=0.03$  mm,  $\theta=30^\circ$ 。

由于有限元程序中没有蜂窝结构的单元,蜂窝结构的有限元分析不能直接进行,因此利用三明治夹芯板理论将蜂窝芯等效成厚度不变的二维正交各向异性板并进行等效计算,取  $\gamma$  的值为 0.6,得到的等效参数为

$$E_x = E_y = 66251 \text{ Pa};$$

$$G_{xy} = 24844 \text{ Pa};$$

$$G_{xz} = G_{yz} = 176.7 \text{ MPa}.$$

在有限元网格划分时,采用四边形壳单元 CQUAD4 来模拟平板,用 44 个节点将板匀划分成 30 个单元,然后利用计算出来的等效参数作为输入数据,在 Patran 中建立的蜂窝板有限元模型如图 2 所示。

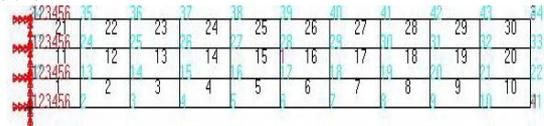


图 2 蜂窝板有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the honeycomb panel

在 Patran 中建立蜂窝板有限元模型后会在 Patran 中生成 bdf 文件,也就是 NASTRAN 的计算输入文件。在 solution type 求解类型选项中选择 Normal modes 模态分析选项,点击 apply 就可以将 bdf 文件读入到 NASTRAN 中进行模态计算。经过计算可以得到蜂窝板一阶固有频率为  $p_a=113.72$  Hz。

蜂窝板一阶振型如图 3 所示。

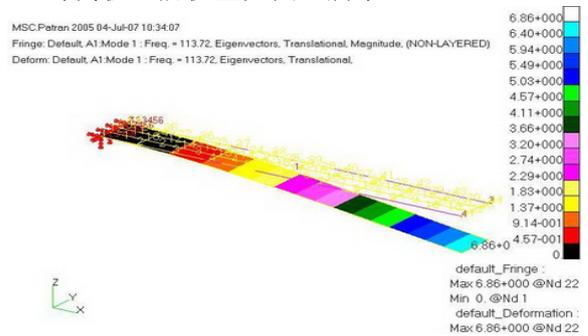


图 3 蜂窝板一阶振型

Fig. 3 The first order shape of honeycomb panel

由图 3 可知,蜂窝板悬臂梁结构一阶振型分布情况为振动剧烈程度随着与固定端距离的增大而加剧,与工程实际相符,在一定程度上验证了模型的正确性。

### 3.2 蜂窝板振动试验

#### 3.2.1 试验目的和设备

振动试验的目的是通过对铝蜂窝夹层板进行振动试验,研究其力学特性,验证有限元模型分析的正确性,为模型修正提供可靠参数。振动试验设备由振动台、控制系统、功率放大系统、控制传感器、信号调节器等组成。结构响应测量系统由传感器、信号调节器、数据采集处理系统组成。其示意图如图4所示。

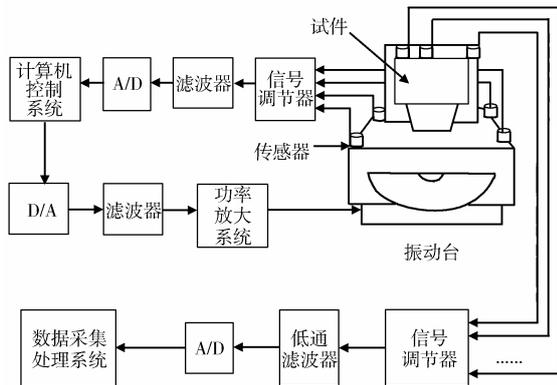


图4 振动系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vibration system

#### 3.2.2 试验过程和数据处理

用夹具将铝蜂窝板一端固定在9t(9×9.8kN)的振动台台面上,固定端埋件长度为50mm,台面控制信号与蜂窝板上输出信号均由加速度计进行采集,加速度计由专用双面胶固定在试件上,其测点布置如图5所示。

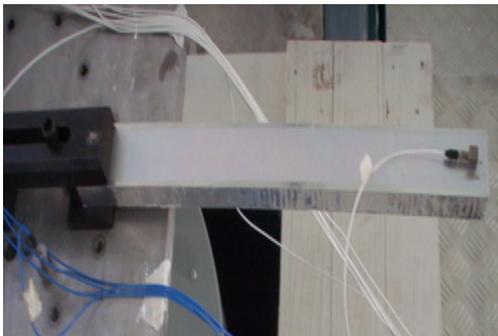


图5 测点布置图

Fig. 5 Measurement point arrangement

由加速度计测得的信号经过信号调节器、低通滤波器、A/D转换器进入数据采集系统。对采集到的输入输出信号进行处理,可得蜂窝板一阶频率为 $p_t=109\text{Hz}$ 。所得一阶频率作为模型修正的依据,使修正后模型计算的一阶频率逼近实测值。

### 3.3 蜂窝板有限元模型修正

建立有限元模型时对结构的物理特性、几何特性、连接条件、约束条件等进行了简化,使得分析结果与实测结果不一致。本文在对蜂窝板有限元模型进行修正的过程中,首先选取设计变量和目标函数,然后建立优化模型并在NASTRAN中对基频进行优化,利用优化结果讨论等效剪切弹性模量计算公式中修正系数 $\gamma$ 的取值。

#### 3.3.1 目标函数的确定

结构的基频对结构的振动有非常重要的作用,因而本文以蜂窝板的基频作为优化的目标。假设试验得到的基频为 $p_t$ ,有限元计算得到的基频为 $p_a$ ,则蜂窝板结构的目标函数为

$$f(x)=(p_a - p_t)^2。$$

#### 3.3.2 设计变量的选取

设计变量是在搜索最优设计过程中可以改变的量。设计变量发生改变,结构的固有特性也会随之发生改变。建立蜂窝板模型时使用的材料参数是在一定原则下的等效参数,跟实际的材料参数值有一定的偏差,因此以蜂窝板的材料参数作为设计变量,通过修改材料参数达到修正结构基频的目的。等效参数包括等效的弹性模量 $E_x$ 、 $E_y$ 和等效的剪切弹性模量 $G_{xy}$ 、 $G_{xz}$ 、 $G_{yz}$ 。由于每个等效参数对基频的影响程度差别较大,把所有的等效参数作为设计变量具有一定的盲目性和局限性,通过分析计算出对基频影响较大的等效参数并将其作为设计变量,这样会大大减少计算量,提高效率。

将等效参数的值分别提高20%,并计算参数改变后基频的值,发现等效参数 $G_{xz}$ 对基频的影响最大,因此本文以等效参数 $G_{xz}$ 为设计变量。在计算等效参数 $G_{xz}$ 时选取的修正因子 $\gamma$ 的值为0.6,而一般情况下 $\gamma$ 的取值范围为0.4~0.6。通过分析可知,在优化的过程中, $G_{xz}$ 的值是减小的,因此令设计变量 $G_{xz}$ 的取值上限比初值稍大,下限为 $\gamma$ 取0.4时的值。综上所述,设计变量的取值范围为 $4.188 \times 10^7 \sim 6.282 \times 10^7 \text{Pa}$ 。

#### 3.3.3 蜂窝板频率优化设计

将bdf文件提交运算,经过4次迭代,优化计算收敛,每一步迭代的基频和设计变量值如表1和表2所示。

表1 基频随迭代次数的变化表  
Table 1 First order frequency in different iterations

| 迭代次数   | 1      | 2      | 3      | 4      |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 基频值/Hz | 113.72 | 111.04 | 109.77 | 109.00 |

表2 每一步迭代的设计变量  
Table 2 Design variable in each step

| 迭代次数                       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 变量值<br>( $\times 10^7$ Pa) | 6.2820 | 5.2820 | 4.6020 | 4.5820 | 4.5820 |

由表1和表2可以看出,蜂窝板基频由113.72 Hz下降到109.00 Hz,优化后基频值与试验测得的基频值吻合,达到了修正目的,证实了修正的有效性。蜂窝板设计变量值随迭代次数增加而减小,且第4次和第5次设计变量修正值相等,这说明设计变量值迭代到一定次数即进行持续冗余迭代,此时变量值恒定,已搜索到最优解。

### 3.3.4 等效剪切弹性模量修正系数 $\gamma$ 的确定

建立有限元模型时用到的材料参数是根据等效公式计算出来的,在计算等效剪切弹性模量 $G_{xz}$ 时,修正系数 $\gamma$ 的取值为0.6。蜂窝板优化后的剪切弹性模量 $G_{xz}$ 的值为 $4.5820 \times 10^7$  Pa,将其代入等效计算公式,反推出修正系数 $\gamma'$ 的值为 $\gamma'=0.4376$ 。将 $\gamma'$ 代入等效计算公式,得到新的剪切弹性模量值为 $G'_{xz} = 4.533 \times 10^7$  Pa。然后将得到的新的弹性模量 $G'_{xz}$ 作为蜂窝板有限元模型新的输入参数,在NASTRAN中计算蜂窝板基频值为 $P_a = 109.82$  Hz。

修正前蜂窝板计算基频与测试基频偏差为4.33%,修正后两者偏差为0.75%,修正后蜂窝板基频偏差有了大幅度下降,达到了模型修正的目的。

的,可见基于优化的模型修正方法是有效的。在以后对相同结构的蜂窝板建模时,可以取 $\gamma = 0.4376$ 计算蜂窝芯的等效参数。

## 4 结论

根据三明治理论以等效剪切弹性模量 $G_{xz}$ 为设计变量,以蜂窝板的基频为目标函数,在NASTRAN中实现了对蜂窝板的基频优化,将优化后的剪切弹性模量代入等效方程中,反推出蜂窝板剪切弹性模量的修正系数 $\gamma$ 作为最终的修正系数。再代入等效计算公式得到新的剪切弹性模量,将其代入蜂窝板有限元模型计算出基频。结果表明,修正后蜂窝板有限元模型计算基频与实测值之间的偏差大幅度下降,达到了有限元模型修正的目的。

### 参考文献 (References)

- [1] 卢小艳,鲁华平,高宗战. 航天器蜂窝结构的传热计算[J]. 机械设计与制造, 2008(3): 47-49
- [2] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92-95
- [3] 罗亚军,牛红攀,徐卫秀,等. 安装蜂窝板动力学特性分析及主动控制试验研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 267-270
- [4] 梁森,陈花玲,陈天宇,等. 蜂窝夹芯结构面内等效弹性参数的分析研究[J]. 航空材料学报, 2004, 24(3): 26-30
- [5] 夏丽娟,金咸定,汪庠宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999-1001

## 航天快讯

### 北京卫星环境工程研究所完成“探月三期”关键技术项目论证

“探月三期”工程的主要任务是实现月面软着陆和自动采样返回,开展月球科学探测。探测器飞行除了要经受各种力环境,冷热交变、超高真空、等离子体、空间辐照、宇宙射线、碎片与微流星等空间环境的严酷考验外,同时还要面对月面着陆和上升阶段的羽流和月尘污染,交会对接过程中的静电放电,隔热材料性能退化、在高速再入阶段中的耐高温和力学过载等一系列复杂问题。

日前,北京卫星环境工程研究所已完成了《探月三期月球探测器环境模拟及效应评价技术研究》的论证工作,并通过多次研讨后梳理出5大关键技术。