

## 卫星整流罩结构动力特性与分离运动分析\*

雷勇军 卓曙君 郑荣跃 任均国

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

**摘要** 针对复合材料蜂窝夹芯板壳组成的卫星整流罩,用有限元法建立了该罩的结构动力学数值模型,编制了相应的有限元分析软件包,计算了全罩、半罩在不同边界条件下的自由振动频率和模态,并分析了抛罩时半罩的分离轨迹和气动力作用下爆炸螺栓的承载情况。

**关键词** 有限元法,整流罩,频率,振型,分离

**分类号** V212

## Dynamic Characteristic and Separation Behavior Analysis for Satellite Fairing

Lei Yongjun Zhuo Shujun Zheng Rongyue Ren Junguo

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper gives the structural dynamic FEM model and corresponding FEM software package for a certain honeycomb sandwich composite satellite fairing. The natural frequencies and modes of the whole and half fairing under different boundary conditions are calculated. The separation behavior of half fairing and the load distribution in all binder blots subjected to aerodynamic load are analyzed.

**Key words** FEM, fairing, natural frequency, natural mode, separation

运载火箭将卫星运往预定轨道的途中,需要通过稠密大气层。整流罩在这一过程中起到保护卫星的作用,使其免受气动加热、加载、声振等环境因素的危害,但在大气稀薄的高空,卫星无需保护时,应尽早与运载火箭解锁分离。由于半罩结构外形尺寸大,周向刚度低,分离时,在冲击力作用下整流罩壳体作刚体运动的同时会产生部分弹性振动。壳壁的弹性振动可能会减少整流罩在分离时与卫星之间的间隙,增加相碰的危险性。为

\* 1996 年 11 月 21 日收稿

了准确地预测分离过程中壳壁的弹性变形，避免发生罩体与卫星碰撞的可能性，需要对整流罩在分离力作用下的弹性振动进行深入的理论计算分析与大量的模拟实验。本文用有限元方法建立了卫星整流罩的结构动力学模型，并计算了全罩和半罩在不同边界条件下的结构动力学特性、半罩分离轨迹、以及气动力作用下爆炸螺栓的承载情况。

## 1 有限元模型

卫星整流罩由两个蜂窝夹芯复合材料半罩铆接而成，在连接处装有分离用的火工品系统。整流罩分四部分：前锥帽、前锥段和筒段、倒锥段。每部分相接处有加强框，分离面有加强桁。计算时，主要选用了八结点等参壳单元<sup>[1]</sup>，这种单元考虑了横向剪切效应和转动惯量的影响，比较适合于复合材料板壳的计算。同时为了适应这种八结点等参壳单元的需要，还独立推导了三结点等参梁单元的公式，用它来模拟各种加强筋和承力桁。

为适应壳体形状的变化，以及便于保证结点位移的协调，加强筋考虑为三结点等参梁单元。单元的结点自由度和壳单元同样取为： $\{\delta_i\}_b = \{u_i \ v_i \ w_i \ \alpha \ \beta\}_b^T$ 。其几何插值与位移插值分别为：

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} + h_i \mathcal{T} 3i + b_i \mathcal{N} 2i \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^3 N_i(\xi) \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + [b_i \mathcal{N} 3i - h_i \mathcal{T} 2i \quad h_i \mathcal{T} 1i] \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

它的单元刚度矩阵  $[K]_b^e$  与单元质量矩阵  $[M]_b^e$ ，根据有限元方法不难得到。单元节点  $i$  的位移从局部坐标系到整体坐标系的转换矩阵为  $[T_1]^i = [e_1^i \ e_2^i \ e_3^i]$ ，其中  $\{e_k^i\}$  ( $k=1, 2, 3$ ) 是局部坐标轴的方向余弦， $b_i$  和  $h_i$  分别是单元截面的宽度与高度，其他量参看文 [1]。

把梁看成是壳体的一部分，将壳体位移沿法线方向，从  $i_s$  点延拓到梁的形心  $i_b$  点，如图 1 所示。位移协调关系分两部分。

( ) 平动位移协调关系：

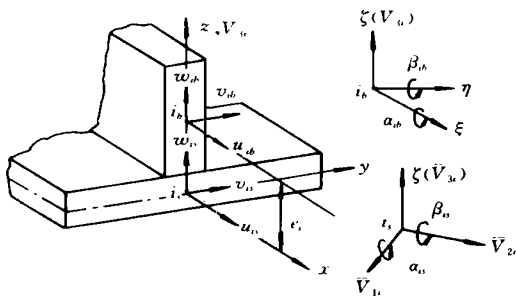


图 1 梁与壳单元结点位移协调关系

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_j \end{Bmatrix}_b = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_j \end{Bmatrix}_s + e_i [\bar{V}_{1i} \bar{V}_{2i}] \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix}_s \quad (3)$$

( ) 转动位移协调关系:

$$[T_1] \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix}_b = [T_2] \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix}_s \quad (4)$$

其中  $[T_2] = [\bar{V}_{2i} \bar{V}_{1i}]$ ,  $e_i$  是梁结点偏心距, 下标  $s$  和  $b$  分别表示壳单元和梁单元。

## 2 整流罩计算模型

计算中将蜂窝夹芯材料看成是三层层合板复合材料 (两层复合材料面板和一层夹芯层), 并近似认为夹芯不承受面内拉压载荷, 计算时仅考虑夹芯的剪切刚度。壳体中面法线方向在段连接处有突变, 本文对三种处理方式 (平均法线、圆弧段过渡、坐标转换) 进行了比较, 从计算结果看, 采用坐标转换方式效果最佳。加强框被等效成截面为四边形的梁单元。半罩分离的边界条件是下底边两点简支; 计算全罩结构动力特性时, 根据结构对称性, 仅计算了 1/2 部分, 相应的边界条件是下端固定, 对称面上限制一平动和一转动自由度。计算半罩分离运动时, 采用 Newmark 方法进行数值积分, 且取  $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ , 所求位移即包括弹性变形也包括刚体位移。整流罩的分离力  $F$  与行程的关系由试验确定, 计算时需把力作为位移的函数转化为作为时间的函数。

## 3 计算结果与简单结论

通过数值计算得到了半罩和全罩在一定边界条件下的固有频率和相应振型, 以及在分离力作用下的半罩分离轨迹。附表列出了全罩和半罩在不同边界条件下的固有频率计算值。其中, 第一阶固有频率对应的是梁式振型, 这一阶频率与振型在工程中最为关心。据文献表明<sup>[4]</sup>, 它对半罩的弹性振动有决定性影响; 第二、三阶分别是对称弯曲振型; 第四、五阶分别是扭转振型; 第六阶是薄壳和梁式耦合振型。图 3 给出了半罩在自由状态下前三阶振型。

计算全罩的结构动特性时, 还直接将全罩划分为较粗略的网格, 其结果与仅计算 1/2 所得结果相近。全罩的第一阶频率明显高于半罩的最低频率, 其振型同样是梁式弯曲振型; 第三、四、五阶主要是筒段发生较明显的薄壳振动。从结果可以得出, 在不同的边界条件下, 半罩的结构动力特性有较大差别, 因此在计算中如何提取适合实际情况的边界条件非常重要, 这一点也是影响数值计算精度与正确性的重要因素。

根据计算结果可以得出, 半罩在分离力作用下作刚体旋转的同时, 分离面会发生较明显的弹性振动变形。其中半罩顶点分离运动主要

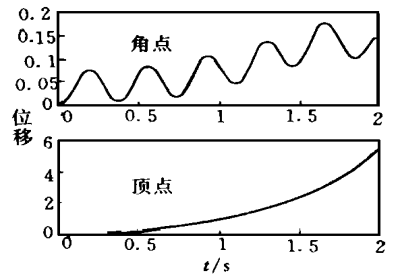
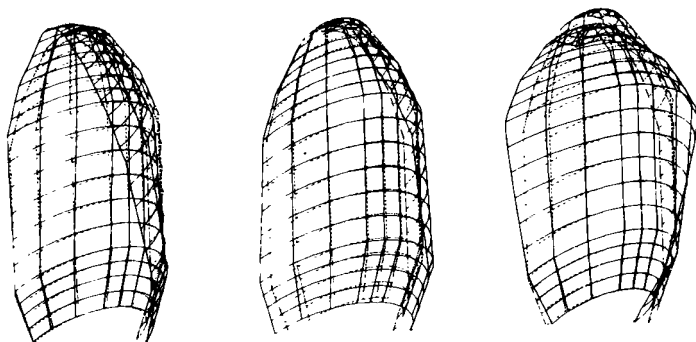


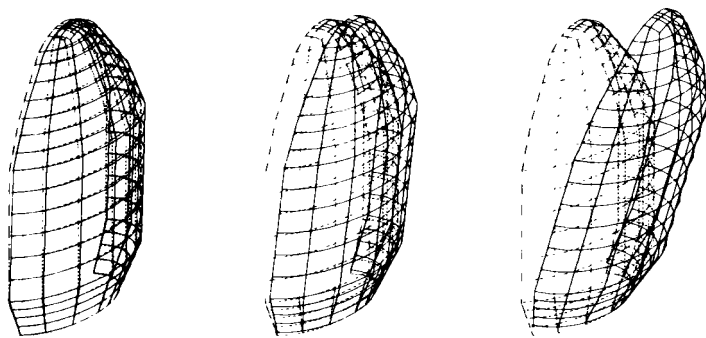
图2 半罩角点和顶点的分离运动轨迹图

是刚体旋转，弹性变形很小；而角点的弹性变形较明显。跟踪整个分离过程两半罩的运动轨迹可以看出，整流罩不仅能顺利分离火箭，且在分离过程中壳壁不会与有效载荷（卫星）发生碰撞。图 2 给出了分离过程中，半罩角点和顶点的运动轨迹。图 4 给出了分离最初时刻半罩位置变化示意图。半罩分离运动的最初时刻，分离速度较慢，而后分离速度明显加快。



(a) 第 1 阶                      (b) 第 2 阶                      (c) 第 3 阶

图 3 半罩下端完全自由时的模态振型



(a)  $t_1$  时刻                      (b)  $2t_1$  时刻                      (c)  $3t_1$  时刻

图 4 不同时刻半罩分离位置变化情况

气动力作用下，整流罩内外出现压力差，引起螺栓承受较大载荷。本文计算时考虑了压力差沿环向分布的不均匀性，计算结果表明，所有螺栓中主要是罩体下端螺栓承受较大拉力载荷，但均小于最大许用载荷值。因此，分离面连接螺栓是安全的。

附表 半罩和全罩的固有频率计算结果

模态数		1	2	3	4	5	6
半	完全自由	3.96	5.28	10.68	13.62	16.95	22.05
罩	下端固定	6.86	8.64	18.45	20.00	31.15	-
全罩	下端固定	33.1	51.6	52.2	68.85	70.7	-

本文完成过程中，得到阎君等同志的大力支持与帮助，谨表深切谢意。

## 参 考 文 献

- 1 丁浩江等编著. 弹性和塑性力学的有限元法 (修订本). 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 Ross CT. Finite Element for the Vibration of Cones and Cylinders. Int. J. Num. Methods in Eng, 1975, 9: 833 ~ 845
- 3 刘更编著. 结构动力学有限元程序设计. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 4 Bertran. 用扩充的模态鉴定试验验证阿里安 4 卫星有效载荷整流罩数学模型. 中国航天, 1992, 12
- 5 长征二号 E 火箭有效载荷整流罩分离技术. 中国航天, 1992, 8

(责任编辑 石少平)