

双级延伸喷管模态分析*

刘 勇 琼

(陕西动力机械研究所, 西安, 710025)

摘 要: 采用有限元法对双级延伸喷管收拢状态进行了模态分析, 基础喷管的出口锥和两级延伸锥采用四节点壳元, 延伸喷管的展开作动筒采用三维梁单元。最后给出了前六阶振型及对应的频率。

主题词: 固体推进剂火箭发动机, 可延伸喷管, 模态分析, 有限元法

分类号: V435.23

MODAL ANALYSIS FOR SOLID ROCKET NOZZLE WITH TWO SEGMENT EXTENDIBLE EXIT CONES

Liu Yongqiong

(Shaanxi Inst. of Power Machinery, Xi'an, 710025)

Abstract: A Modal analysis for solid rocket nozzle with two segment extendible exit cones (EECs) in stowed condition is presented, in which four-node-shell elements are used for basic cone and EECs, and 3D-beam elements for stretching actuators. The first six orders of mode shapes and their frequencies are also given in the paper.

Subject terms: Solid propellant rocket engine, Extension nozzle, Modal analysis, Finite element method

1 引 言

固体火箭发动机的延伸喷管在发动机点火至工作结束这一阶段, 延伸出口锥通过作动筒展开, 处于工作状态。除此之外, 延伸喷管都处于收拢状态。工作状态时, 由于延伸锥展开, 延伸锥、基础喷管已由锁紧装置锁紧, 其整体性较好, 与不带延伸锥的整体喷管基本一样。而收拢状态要经历贮存、运输、下面级发动机工作等过程, 受到各种载荷的影响。收拢状态延伸锥与基础喷管靠展开作动筒连接, 整体性能不如展开状态好, 其频率特性和振型都会有别于展开状态的延伸喷管。此外, 套筒式延伸喷管处于收拢状态时, 延伸锥靠展开作动筒的自锁来固定, 延伸喷管的振动会对作动筒产生冲击力, 如冲击力过大, 将会使作动筒破坏, 或使自锁机构失效。因此有必要对双级延伸喷管在收拢状态下进行模态分析, 以给设计提供依据。

2 模型的建立

双级延伸喷管的结构如图1所示, 它由一个基础喷管, 两级延伸锥和四个双级展开作动筒组成。基础喷管的扩张段和两级延伸锥都属于薄壳结构。延伸喷管在收拢状态, 展开作动筒和推力向量控制系统均处于自锁状态, 即喷管是不可摆动的。因此对延伸喷管的收拢状态进行

* 本文1995年12月16日收到, 曾在94年9月第三届中·俄·乌宇航科技大会分组会上宣读

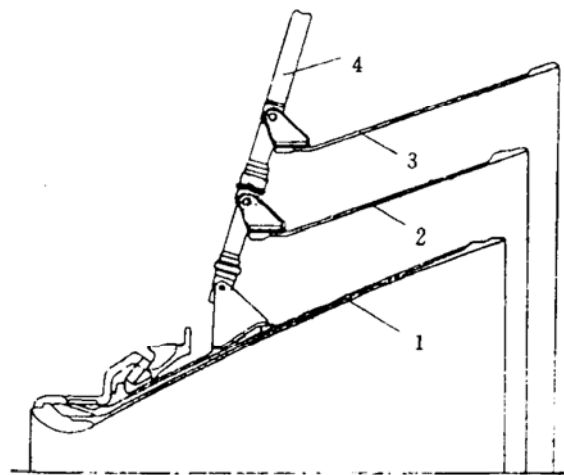


Fig. 1 SRM nozzle with two EECs

1. Basic nozzle 2. First EEC
3. Second EEC 4. Stretching actuators

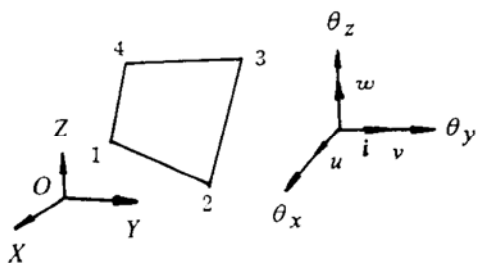


Fig. 2 4-node shell element

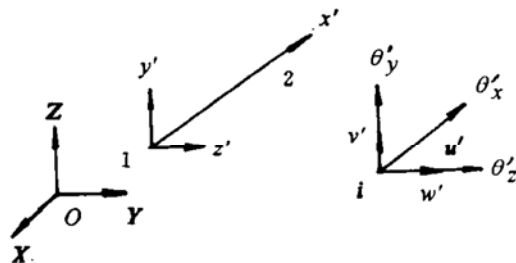


Fig. 3 3-D beam element

振动分析时,对柔性接头可以不予考虑,按简支处理,只对基础喷管的扩张段和延伸锥以及展开作动筒进行分析。

延伸喷管的基础喷管扩张段及延伸锥均采用四节点薄壳元处理,单元如图2所示。每个节点共六个自由度,即 $u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 。对展开作动筒,每个作动筒可以认为是一个连续梁,它的两端分别与基础喷管、第二级延伸喷管铰连,一级延伸锥在梁的中部与之铰连。因而可以采用三维梁元(如图3所示)处理。根据双级延伸作动筒的结构特点,每个作动筒取二个单元。

经过结构离散化后,可以计算各单元的刚度矩阵和质量矩阵,通过坐标变换、组集后得到结构的刚度矩阵 $[K]$ 和结构的质量矩阵 $[M]$,最后得到结构的自由振动

方程如下:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad (1)$$

式中 $\{\delta\}$ 为节点位移列阵。方程 (1) 有如下形式的解:

$$\{\delta\} = \Phi_i \sin(\omega_i t + \alpha_i) \quad (2)$$

式中 Φ_i 为第 i 阶振型的特征向量, ω_i 为固有频率, α_i 为相角。

将式 (2) 代入式 (1), 略去 $\sin(\omega_i t + \alpha_i)$, 可以得到:

$$([K] - \omega_i^2 [M]) = 0 \quad (3)$$

上式即为数学上的特征值问题,使它存在非零解的唯一条件是:

$$|[K] - \omega_i^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

从而可以得到频率 ω_i ($i=1, 2, \dots, n$) 及特征向量 Φ_i ($i=1, 2, \dots, n$)。

3 算例及结果

对某双级延伸喷管进行了计算,喷管的边界处理为简支,共计算了前六阶振型和频率。各阶频率见表1,各阶振型见图4所示。从振型图中可以看出:

a. 前三阶振型延伸作动筒作变形振动,基础喷管及延伸锥均无变形,一、二阶振型为作动筒偏转振动,三阶振型为双级延伸锥在喷管轴线方向上平动。

Table 1 Frequencies and mode shape descriptions

Order	Frequency	Description
1	33. 4Hz	First order of mode shape of actuators
2	35. 6Hz	Second order of mode shape of actuators
3	47. 8Hz	Third order of mode shape of actuators
4	57. 8Hz	Vectoring mode of second EEC
5	67. 6Hz	First order of mode shape of first and second EECs
6	85. 7Hz	Second order of mode shape of first and second EECs

b. 四阶振型为二级延伸锥作变形振动，形状为椭圆形；五阶振型为双级延伸锥变形振动，形状均为椭圆形；六阶振型为两级延伸锥作变形振动，振形呈四边形。

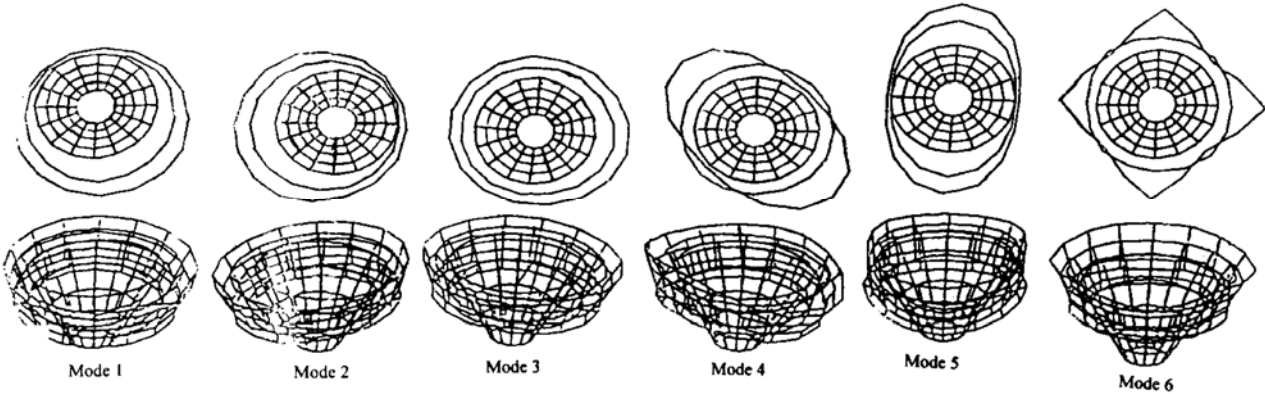


Fig. 4 Mode shapes

c. 计算的六阶振型基础喷管均未变形，其变形振动的频率会更高。

4 结 论

- a. 双级延伸喷管在收拢状态最先开始的振动为双级展开作动筒，其次为二级延伸锥、一级延伸锥、基础喷管。说明喷管的刚度特性以作动筒最差，其次为二级延伸锥、一级延伸锥，基础喷管的刚度最好。
- b. 延伸喷管在收拢状态，前三阶频率与展开作动筒的刚度有关，如果作动筒的刚度特性好，频率就会高，反之则低。
- c. 发动机在运输或下面级工作时，其主要激励频率比较接近于前三阶固有频率，因此对延伸喷管来说，在收拢状态下作动筒处于最危险状态，工程设计中应予以重视。

参 考 文 献

1 Weaver William, Johnston Jr Paul R. Structural dynamics by finite elements. Prentice-Hall, Inc, 1987
2 谢贻权 何福保主编. 弹性和塑性力学中的有限元素法. 北京: 机械工业出版社, 1982