

复合阻尼结构梁动力特性分析

张 醒¹ 徐 超¹ 李 莉¹ 游少雄²

(1 西北工业大学航天学院,西安 710072)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 提出一种基于 Layerwise 层合理理论的复合阻尼结构梁单元用于计算嵌入多阻尼层的复合阻尼结构梁。通过与 NASTRAN 软件的计算结果进行对比,证明该梁单元满足层间位移、应力连续条件并避免了剪切自锁,并且具有单元数量和节点数量少、计算精度高的优点。

关键词 复合材料,有限元,层合理理论

Dynamic Analysis for Composite Laminated Beam With Multiple Damping Layers

Zhang Xing¹ Xu Chao¹ Li Li¹ You Shaoxiong²

(1 College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

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

Abstract Based on the layerwise theory, a composite laminate beam element is proposed. The present solutions are compared with solutions of business software. Numerical results show that the present element has lower numbers of the elements and nodes, higher accuracy.

Key words Composite, Finite element, Layerwise

1 引言

随着航空航天技术的发展,飞行器所处的振动、冲击、噪声等力学环境比过去更为复杂和恶劣,对于减振技术有了更高的要求。结构阻尼一体化技术是一种新型高效的减振技术,其减振原理是通过某种方式将高阻尼材料添加到结构中,增大结构的模态阻尼比,有效控制共振区附近动态响应。由于复合材料的各向异性以及结构应力状态的复杂性,阻尼机理的多样性和复杂性,针对此类结构的分析理论和方法仍不成熟,成为结构阻尼一体化复合材料结构设计的一个瓶颈。目前常用的分析层合板的基于高阶理论或退化壳理论的单元在分析这种各层物理化学性质差别巨大的结构时精度上无法满足工程应用要求。

Layerwise 分层理论是计算层合板力学特性高阶理论。早期它在求解层合板结构沿厚度方向变化的层间剪应力分布中发挥了重要的作用。本文将该理论应用于分析嵌入多阻尼层的复合阻尼结构梁结构,推导了对应的有限元单元方程式,并将仿真结果与商

业软件计算结果相对比,结果表明,该单元在求解复合阻尼结构梁的动态性方面具有精度高、计算耗费小的优点。

2 有限元单元推导

2.1 复合阻尼结构分析模型

早在 1959 年, Ross, Unger 和 Kewin 就提出了 RUK 模型^[1]。这是一个用于计算阻尼的三层的层合板模型。该模型假设横向剪切应变在每一层都是常数。在此基础上, Sun, Whitney^[2]于 1973 年提出了一个离散多层模型。在这个模型中 Sun 和 Whitney 假设层内的拉伸和旋转产生于各个层的中性面。1987 年, Alam, Asnani^[3]提出了一个更简化的离散多层模型。他们假设在模型中层内的拉伸和旋转产生在层间的分界面上,所以该模型中横向位移场在层间分界面上的连续性是自然满足的,不需要额外的条件去限定。上述两个模型和 RUK 模型一样,也假设每一层的横向剪应变是一个恒值。在 1992 年, Wu C 和 Kuo^[4]提出了一个静态离散层模型。在该模型中,每

收稿日期: 2007 - 09 - 30

作者简介: 张醒, 1982 年出生, 硕士研究生, 主要从事飞行器复合材料结构分析的研究
宇航材料工艺 2007 年 第 6 期

一层的面内横向位移场都采用三次函数来描述。虽然它对于同一个结构有着比 Alami - Ssnani模型多出一倍的自由度,但是利用这个模型计算出来的近似解与解析解非常吻合。本文在现有的层合理论的基础上,建立了一个避免了剪切闭锁,位移定义在分界面上可用于精确分析阻尼结构的层合单元。

2.2 层合梁单元的建立

2.2.1 模型简述

层合梁单元的几何模型如图 1 所示。其中, U_k^A 为第 k 个分界面在节点 A 处的轴向的位移。 W^A 为节点 A 处的横向位移。 t_k 为第 k 层的厚度, h_k 为第 k 个分界面到基准面的距离。为了便于计算,在这个模型中,取基准面为单元底面。每个单元共有三个节点,依次设为 A、B、C。其中, A、C 节点均具有每个分界面上的轴向位移自由度和该节点的横向位移自由度, B 节点只有一个横向位移自由度。由此可见,单元中每一层的轴向为线性位移模式,横向为抛物线性位移模式。

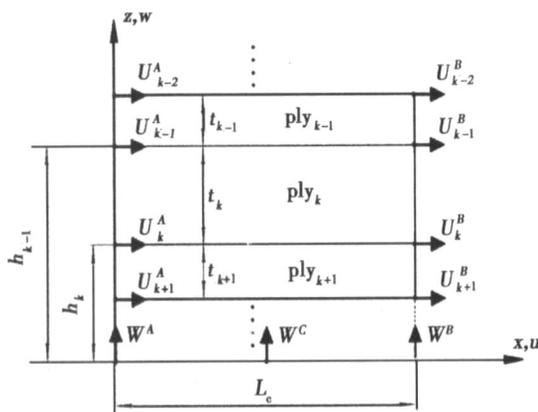


图 1 层合单元节点自由度

Fig 1 Nodal degrees of freedom for DLFE

2.2.2 单元刚度和质量矩阵推导

2.2.2.1 位移场插值

首先建立单元的位移模式

$$\begin{Bmatrix} u(x, z) \\ w(x) \end{Bmatrix}_k = [F(z)]_k \begin{Bmatrix} u_{k-1}(x) \\ u_k(x) \\ w(x) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 $[F(z)]_k$ 是横向厚度上的插值矩阵。公式中左侧为第 k 层的位移。右侧为第 k 层界面上的位移。进一步用节点自由度表示为

$$\begin{Bmatrix} u_{k-1}(x) \\ u_k(x) \\ w(x) \end{Bmatrix} = [N(x)] \{U\}_k \quad (2)$$

式中, $\{U\}_k$ 为节点位移, 展开为

$$\{U\}_k = \{U_{k-1}^A, U_{k-1}^B, U_k^A, U_k^B, W^A, W^C, W^B\}^T \quad (3)$$

上式中包含了定义第 k 层的位移所需要的所有节点位移。

$[N(x)]$ 为形状函数矩阵:

$$[N(x)] = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_1 & n_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_1 & w_2 & w_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

联立上述三式, 可推导出节点位移与单层位移的关系

$$\begin{Bmatrix} u(x, z) \\ w(x) \end{Bmatrix}_k = [F(z)]_k [N(x)] \{U\}_k \quad (5)$$

2.2.2.2 单元质量、刚度矩阵

单元内的应变—位移关系如下

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ \epsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6), 可得

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \{ [F(z)]_k [N(x)] + [F_d] [N(x)] \} \{U\}_k = [B(x, z)]_k \{U\}_k \quad (7)$$

根据最小余能定理, 则可得第 k 层的刚度矩阵和质量矩阵:

$$[K_e]_k = b \int_{h_k}^{h_{k+1}} [B]_k^T [E]_k [B]_k dx dz \quad (8)$$

$$[M_e]_k = b \int_{h_k}^{h_{k+1}} [N]_k^T [F]_k^T [F]_k [N]_k dx dz \quad (9)$$

式中

$$[E]_k = \begin{bmatrix} E_k & 0 \\ 0 & G_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

将各层的刚度矩阵和质量矩阵转换到单元坐标系中

$$\{U\}_k = [T]_k \{U_e\} \quad (11)$$

式中

$$\{U_e\} = \{U_0^A, U_1^A, U_2^A, \dots, U_{N_{ply}}^A, W^A, W^C, U_0^B, U_1^B, U_2^B, \dots, U_{N_{ply}}^B, W^B\}^T \quad (12)$$

最后, 可得单元刚度矩阵、质量矩阵:

$$[K_e] = \sum_{k=1}^{N_{ply}} [T]_k^T [K_e]_k [T]_k \quad (13)$$

$$[M_e] = \sum_{k=1}^{N_{ply}} [T]_k^T [M_e]_k [T]_k \quad (14)$$

3 仿真算例

为了检验单元的有效性和精度, 取两端固支的矩形截面层合梁, 计算其弯曲的固有频率和振型。同时使用商业有限元分析软件 NASTRAN, 采用实体单元

+板单元偏置组合建模方法进行分析对比。

3.1 算例 1

设矩形截面层合梁长度为 100 mm,宽度为 5 mm,层数为 3,每一层厚度均为 1 mm。第 1、3层弹性模量 $E_1 = E_3 = 60$ GPa,泊松比为 $\mu_1 = \mu_3 = 0.33$;中间层为阻尼材料,弹性模量为 $E_2 = 7.5$ MPa,泊松比为 $\mu_2 = 0.496$ 。图 2是用 Patran建立的模型。其中,1、3层采用偏置板元,中间层采用三维实体单元。计算结果比对见图 3。

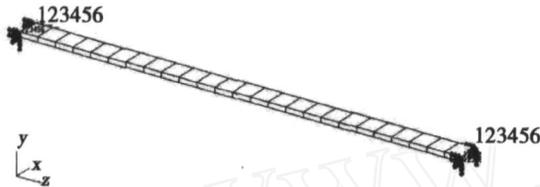


图 2 Patran建立的模型 1
Fig 2 Model 1 with Patran

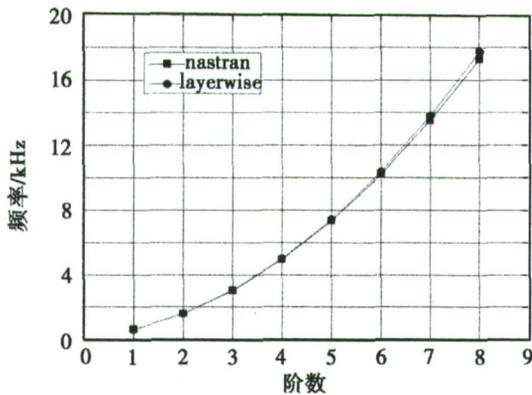
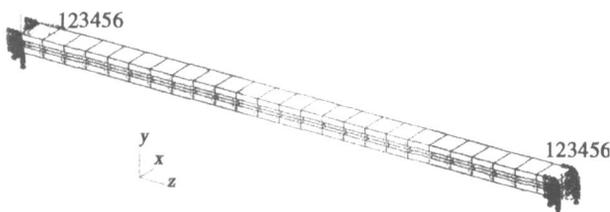


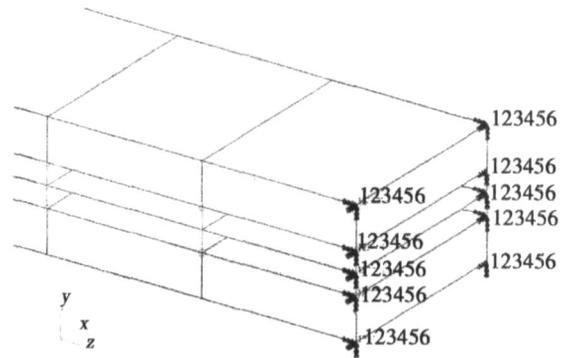
图 3 模型 1固有频率计算结果
Fig 3 Natural frequencies of Model 1

3.2 算例 2

设矩形截面层合梁长度为 100 mm,宽度为 5 mm,层数为 5,每一层厚度均为 1 mm。第 1、3、5层弹性模量 $E_1 = E_3 = E_5 = 60$ GPa,泊松比为 $\mu_1 = \mu_3 = \mu_5 = 0.33$;第 2、4层为阻尼材料,弹性模量为 $E_2 = E_4 = 7.5$ MPa,泊松比为 $\mu_2 = \mu_4 = 0.496$ 。图 4是用 Patran建立的模型及其局部。



(a) 整体



(b) 局部

图 4 Patran建立的模型 2

Fig 4 Model 2 with Patran

其中 1、5层采用偏置板元,第 3层采用普通板元,第 2、4层采用三维实体单元。由于二四层必须满足其几何位置,所以,2、4层的各个节点与第 3层的相应节点采用多点约束 (MPC)连接,保证其几何连续性。计算结果比对见图 5。由于该单元的数量与层数无关,故在层数较多时,该方法具有很高的应用价值。

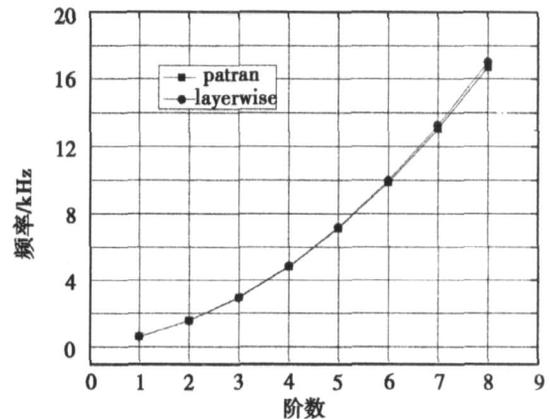


图 5 模型 2固有频率计算结果

Fig 5 Natural frequencies of Model 2

表 1 算例 1所需单元及节点数

Tab 1 Num. of Elements and Nodes with Model 1

| 数据来源 | 节点数 | 面单元 | 体单元 | 单元数 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| Patran | 107 | 50 | 25 | 75 |
| 本文算例 1 | 41 | - | - | 20 |

表 2 算例 2所需单元及节点数

Tab 2 Num. of Elements and Nodes with Model 2

| 数据来源 | 节点数 | 面单元 | 体单元 | MPC | 单元数 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Patran | 260 | 75 | 50 | 104 | 229 |
| 本文 | 51 | - | - | - | 25 |

4 结论

(1)计算表明本文所建立的基于层合理论的复合阻尼结构梁单元是一种具有很高精度的梁单元。

(2)由于该单元的数量与层数无关,故在层数较多时,该方法具有很高的工程应用价值。

参考文献

1 Ross D, Ungar E E, Kerwin E M et al Flexural vibrations by means of viscoelastic laminae Structure Damping, ASME 1959: 48 ~ 87

2 Sun C, Whitney J M. Theories for the dynamic response of laminated plates AIAA Journal, 1973; 11: 178 ~ 83

3 Alam N, Asnani N T Refined vibration and damping analysis of multilayered rectangular plates Journal of Sound and Vibration, 1987; 119: 347 ~ 62

4 Wu C, Kuo H Interlaminar stresses analysis for laminated composite plates based on a local high order lamination theory Composite Structures, 1992; 20: 237 ~ 47

(编辑 吴坚)

www.cnki.net