

# 液体火箭发动机涡轮叶片结构特性的有限元分析\*

魏鹏飞, 吴建军, 陈启智

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为了提高液体火箭发动机的可靠性、可用性以及可维护性而进行的发动机寿命预估与减损控制研究, 需要对发动机的零(部)件进行结构特性分析。通过建立某型液体火箭发动机涡轮转子叶片的有限元分析模型, 分别进行无阻尼自由振动下的模态分析、无阻尼强迫振动下的谐波响应分析与有阻尼强迫振动下的瞬态响应等结构特性分析, 得到涡轮转子叶片的固有频率及与之对应的振型、谐波响应与瞬态响应。

**关键词:** 液体推进剂火箭发动机; 涡轮转子叶片; 有限元分析; 减损控制

中图分类号:        文献标识码: A

## Finite Element Analysis of the Turbine Blade Structural Characteristics for Liquid Propellant Rocket Engine

WEI Peng-fei, WU Jian-jun, CHEN Qi-zhi

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** It is necessary to analyze the structural characteristics of the engine key components so as to be able to predict the engine life and mitigate the components damage, and extend the engine life for improving the reliability, availability and maintainability of liquid rocket engines. The model of the turbine rotor blade with finite element analysis for the newly developing large-thrust liquid rocket engine is set up. Based on these models, characteristics analysis of structural dynamics such as modal analysis under undamped free vibration, harmonic response under undamped forced vibration and transient response under damped forced vibration, is performed respectively. Meanwhile, natural frequencies and mode shapes, harmonic response and transient response of a single turbine rotor blade, are also obtained.

**Key words:** liquid propellant rocket engine; turbine rotor blade; finite element analysis; damage-mitigating control

在液体火箭发动机系统中, 涡轮叶片是其关键零(部)件之一, 减小该部件的损伤, 整个发动机系统的寿命将得到延长。因此, 作为减损与延寿控制技术中关键部件的结构动力学分析是连接系统动力学与结构材料损伤分析之间的纽带。结构动力学的解析解难以得到, 在实际的分析中往往应用有限元分析法来求解其数值解。在液体火箭发动机的设计与试验过程中, 经常也做一些结构动力学特性试验, 包括模态试验、谐波响应与瞬态响应分析以及振动试验等, 其目的一方面是辅助设计以得到优化的结果, 另一方面是对试验过程进行模拟与分析, 为故障诊断与寿命分析提供可靠的参考<sup>[2]</sup>。

### 1 涡轮转子叶片的有限元分析模型

用三维 10 节点四面体单元离散叶片, 设定划分精度, 对叶片进行网格划分, 图 1 给出了涡轮转子叶片的有限元分析模型。

### 2 涡轮转子叶片结构动特性分析

针对某型液体火箭发动机涡轮转子叶片, 进行模态、谐波响应与瞬态响应等结构动力学特性分析。根据物理模型, 对图 1 所示的涡轮转子叶片模型的下表面各节点的所有自由度施加位移约束。

\* 收稿日期 2004 - 07 - 10

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50276068)

作者简介 魏鹏飞(1975—), 男, 博士生。

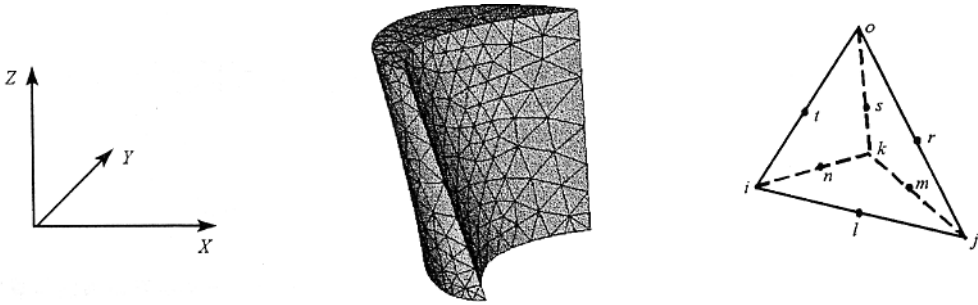


图1 涡轮转子叶片的有限元分析模型

Fig.1 FEM analysis model of turbine rotor blade

2.1 模态分析

模态分析可考察涡轮转子叶片在无阻尼自由振动响应下的自然频率及与之相对应的振型。表1给出了涡轮转子叶片的前四阶自然频率值,图2给出了用节点相对位移云图表示的涡轮转子叶片前三阶振型(图中上排)及对应的相对应力分布云图(图中下排),同时给出了涡轮转子叶片变形(用节点的相对位移表示)前与变形后的形状,图中实体表示变形后的形状,虚线为未变形的涡轮转子叶片轮廓线。

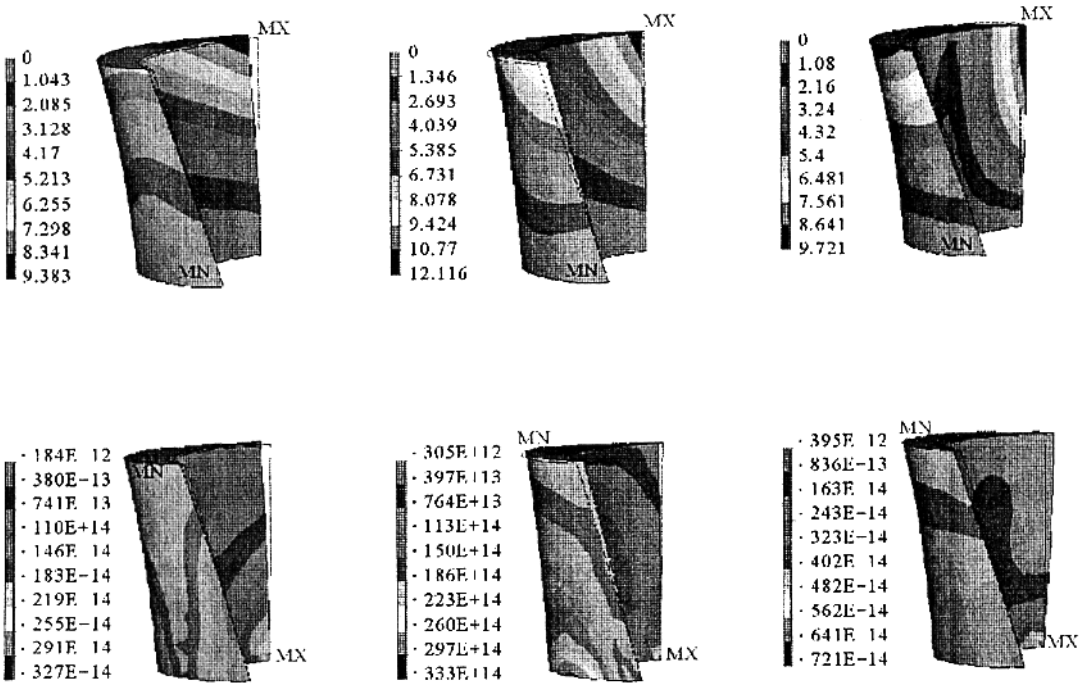


图2 涡轮转子叶片的前3阶振型与应力云图

Fig.2 The first 3 mode shape and stress contours

表1 涡轮转子叶片的固有频率

Tab.1 Nature frequency of turbine rotor blade

No. Mode	Nature Frequency Valv( Hz )	No. Mode	Nature Frequency Valv( Hz )
1	6358	3	13023
2	9327	4	25244

由图示结果可知,第一阶振型表现为弯曲变形,第二阶振型表现为扭转变形,第三阶振型表现为弯扭变形,它们代表了涡轮转子叶片的基本振型。相对应力云图清晰地表示出,涡轮叶片根部靠近气流出出口位置的应力最大(图中MX处),即此处为结构的应力危险点。

## 2.2 谐波响应分析

在模型上表面内缘的所有节点的轴向、周向与径向分别施加相同的作用力,用来模拟涡轮叶片在工作时所受的离心力与气动力。给定的频率范围为 $0 \sim 20\,000\text{Hz}$ ,载荷步为200。图3给出的计算结果表明,与前述的模态分析所得自然频率吻合较好,清晰地说明了在不同频率作用力的激励下,涡轮叶片的位移响应在自然频率处会引起共振,分析结果可为涡轮叶片的调频与错频提供参考。

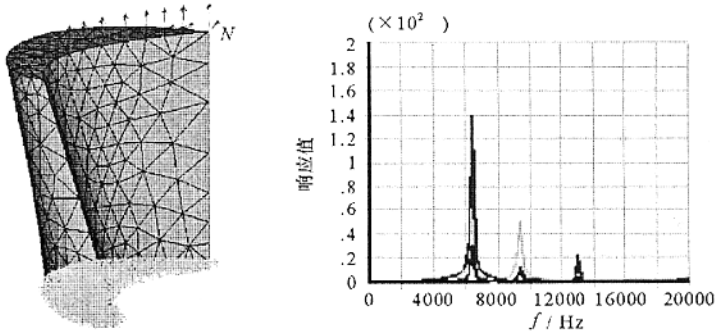


图3 在无阻尼强迫载荷作用下涡轮转子叶片的谐波响应

Fig.3 Harmonic response of turbine rotor blade under undamped forced load

## 2.3 瞬态响应分析

图4(a)为无阻尼的结果,表示节点N在所施加的阶跃载荷作用下的振动;图4(b)为有阻尼的结果,表明结构振动在阻尼的影响下,发生明显的衰减,最终稳定于平衡位置。

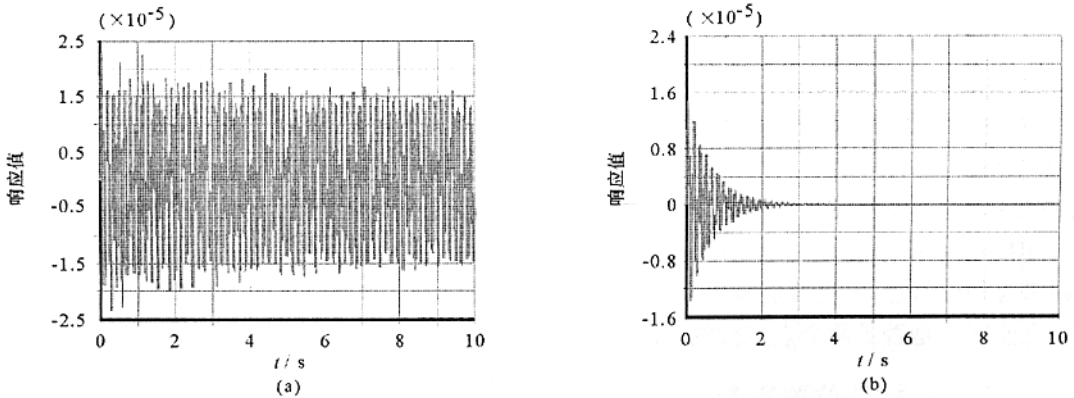


图4 涡轮转子叶片的瞬态响应

Fig.4 Transient response of turbine rotor blade

## 3 结束语

火箭发动机涡轮转子叶片的自然频率及振型,在给定频率谐振力作用下涡轮转子叶片的稳态响应,涡轮叶片的应力危险点以及容易出现共振的频率点,这些信息为设计过程提供了有用的参考。通过瞬态响应分析,计算得到涡轮叶片的时变位移。如果扩展计算过程,可以求解出涡轮叶片的应力谱与应变谱,分析涡轮叶片的寿命,预报故障发生的部位与时机,也可对已发生的故障进行事后分析,并且可为火箭发动机的减损控制提供有关结构动特性的相关信息。

## 参考文献:

- [1] 吴建军,魏鹏飞.液体火箭发动机智能减损与延寿控制技术[J].推进技术,2003,124:484~487.
- [2] Brown A M. Comprehensive Structural Dynamic Analysis of the SSME/AT Fuel Pump First-stage Turbine Blade[R]. NASA/TM-1998-208594, 1998.
- [3] Ray A, Wu M K. Damage-mitigating Control of Space Propulsion Systems for High Performance and Extended Lif[R]. NASA-CR-194470, 1994.

