失谐叶盘结构振动模态局部化研究

邵 帅,周柏卓,王相平 (中航工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

摘要:针对失谐叶盘结构振动特性和模态局部化特性,分别利用有限元法和子结构模态综合法进行分析。对具有 12 个叶片模 拟叶盘结构的振动特性和振动模态局部化特性进行研究,包括失谐形式对模态局部化的影响和模态密度对失谐敏感性的影响,并 利用应变能和模态局部化因子的概念对模态局部化现象进行定量描述。研究表明:子结构模态综合法能满足叶盘结构振动模态特 性的计算精度要求,并能节省大量的计算时间;失谐形式和模态密度对模态局部化程度有显著影响。

关键词:振动特性;振动局部化;失谐叶盘结构;模态密度;模态综合法

中图分类号:V231.92 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.03.012

Investigation of Vibration Mode Localization of Mistuned Bladed-disk Assemblies SHAO Shuai, ZHOU Bai-zhuo, WANG Xiang-ping

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The vibration characteristics and the localization characteristics of a mistuned bladed-disk were analyzed by FEM and substructure component mode synthesis. The vibration characteristics and the localization characteristics of the analog bladed-disk model with twelve blades were investigated, including the effect of mistuning form on vibration localization and the effect of mode density on mistuning sensitivity of a mistuned bladed-disk. The phenomenon of vibration localization was quantitatively described with the concepts of strain energy and localization factor. The results show that the substructure component mode synthesis not only satisfies the precision but also saves computing time. The mistuning form and mode density have significant influence on vibration localization.

Key words: vibration characteristics; vibration localization; mistuned bladed-disk assemblies; mode density; component mode synthesis

0 引言

叶盘结构理论上是周期对称的,但由于制造公 差、材料以及非均匀磨损等因素,导致实际叶片不能 完全相同,即叶片失谐。失谐可以导致叶盘振动局部 化,使少数叶片振幅远远大于其他叶片,可能导致高 周疲劳破坏。叶盘结构的振动局部化问题自 Ewins⁽¹⁾ 等研究发现以来,一直吸引着国内外学者的关注。 Krusehe 和 Pierre^[2]研究了失谐叶盘结构的振动特性 及规律。由于失谐叶盘结构整体建模复杂,计算规模 庞大,因此逐渐衍生了多种减缩建模的理论和方法。 自 20 世纪 60 年代 Hurty^[3]等首先提出了模态综合的 概念之后,很多学者相继对模态综合法进行了研究。 模态综合法通过截去高阶模态,缩减系统自由度,从 而大大降低了计算量和计算时间。张锦等¹⁴⁻⁹研究了失 谐叶盘振动特性分析的不同减缩模型。

本文利用通用有限元法和子结构模态综合法,基 于有限元软件 ANSYS 对模拟叶盘结构进行固有振动 特性分析。在对谐调叶盘结构振动特性分析的基础 上,得到一些失谐叶盘结构振动模态的特点,对失谐 叶盘结构振动模态局部化进行定量分析,并通过计算 验证采用子结构模态综合法进行求解,能够在满足计 算精度要求的基础上降低计算规模,缩短计算时间。

收稿日期:2012-12-11 基金项目:航空动力基础研究项目资助 作者简介:邵帅(1987),女,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机强度与振动;E-mail:593556568@qq.com。

引用格式: 邵帅,周柏卓,王相平.失谐叶盘结构振动模态局部化研究 [J]. 航空发动机,2014,40 (3):56-59. SHAO Shuai, ZHOU Baizhuo, WANG Xiangping. Investigation of vibration mode localization of mistuned bladed-disk assemblies[J]. Aeroengine, 2014,40(3):56-59.

1 模态综合分析理论

模态综合分析理论¹²是把整体模型划分为几个子 结构,利用自由度减缩的方法截断高阶模态,再将各 子结构进行综合分析,从而大大降低计算规模。

在有限元分析中,将有限元模型节点自由度分为 主自由度和副自由度,需要在自由度减缩的过程中去 掉副自由度,按主副自由度对质量和刚度矩阵分块, 得到结构动力方程为

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{a} \\ \ddot{\mathbf{x}}_{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{a} \\ \mathbf{x}_{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{a} \\ f_{b} \end{bmatrix}$$
(1)

式中:{x_a}为主自由度;{x_b}为副自由度。

假设不考虑惯性力,仅在主自由度上作用静态力 {f_a},则静力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_a \\ 0 \end{bmatrix}$$
 (2)

由式(2)得

$$[K_{ba}] \{ x_a \} + [K_{bb}] \{ x_b \} = \{ 0 \}$$
(3)

则

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{a} \\ \mathbf{x}_{b} \end{cases} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ -\mathbf{K}_{bb}^{-1} \mathbf{K}_{ba} \end{bmatrix} \{ \mathbf{x}_{a} \} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \end{bmatrix} \{ \mathbf{x}_{a} \}$$
(4)

式中[T]= $\begin{bmatrix} I\\ -K_{bb} & -1\\ K_{ba} \end{bmatrix}$ 为坐标转换矩阵。

由式(2)、(4),并在方程两端分别前乘[T]¹得

$$\begin{bmatrix} T \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \left\{ \ddot{\mathbf{X}}_{a} \right\} + T \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \end{bmatrix} \left\{ \mathbf{X}_{a} \right\} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} \left\{ \begin{matrix} f_{a} \\ f_{b} \end{matrix} \right\}$$
(5)

即

$$[\mathbf{M}] \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \mathbf{X}_a \end{matrix} \right\} [\mathbf{K}] \left\{ \mathbf{X}_a \right\} = \left\{ \mathbf{f} \right\}$$
(6)

式中:[M]为减缩后模型的质量矩阵;[K]为减缩后 模型的刚度矩阵;{f}为减缩后模型的载荷矩阵。

2 谐调叶盘结构的振动特性分析

建立叶盘结构有限元模型和子结构计算模型,如

图 1 所示。有限元模型采 用 solid95 实体单元划分 网格,共 1560 个单元, 12696 个节点,在轮盘中 心孔施加全约束。



图 1 叶盘结构模型

有限元法与子结构模态综合法计算得来的前 60 阶固有频率值完全一致,如图 2 所示。由于结构具有 周期对称性,0、6 节径以外的阶次均出现重频现象。 根据模态密度可以将各模态划分为不同区域,相邻阶 次的相对频差如图 3 所示。在图中可将前 60 阶频率 划分为 3 个模态密度区,将 1~22 阶频率划分为低模 态密度区,23~38 阶频率划分为高模态密度区,39~ 60 阶频率划分为中度模态密度区。密度高的模态为 叶片振动为主的模态,密度低的模态为轮盘振动为主 的模态。



3 失谐叶盘结构的振动特性分析

利用有限元法和子结构模态综合法对失谐叶盘 结构振动特性进行计算分析,研究失谐程度和模态密 度对振动模态局部化的影响规律。通过弹性模量的改 变将失谐引入结构,定义第i个叶片的失谐系数

$$\delta_{i} = \frac{E_{mi} - E_{t}}{E_{t}}, i = 1, 2, 3 \cdots, 12$$
(7)

式中:Emi为第i个失谐叶片的弹性模量;Et为谐调叶

片的弹性模量。

各叶片失谐系数见表 1。从表中可见,第 2、3 号 叶片失谐系数相同,第 6、7、9 号叶片失谐系数相同。

叶片号	δ_{i}	叶片号	$\delta_{ m i}$	叶片号	δ_{i}
1	0.18115	5	0.12760	9	0.02785
2	-0.09945	6	0.02785	10	-0.07390
3	-0.09945	7	0.02785	11	0.07775
4	-0.02285	8	-0.12445	12	-0.04995

表 1 各叶片失谐系数

3.1 失谐形式对模态局部化的影响

对失谐叶盘结构进行固有振动特性分析,2种方 法的计算结果完全一致,验证了子结构模态综合法的 计算精度能够满足计算要求。提取各叶片的应变能, 绘制出谐调和失谐结构全部叶片的应变能分布,部分 模态的叶片应变能分布如图4所示,从图中可见,谐 调结构各叶片的应变能分布具有周期性,而失谐结构 高模态密度区第23~35阶模态已经失去了谐调结构 原有的周期性,发生强烈的局部化现象。



从图 4(b)中可见,失谐结构第 25 阶模态中第 2、 3 号叶片的应变能相等,表示第 2 个叶片的振动能量 相等,这是由于相邻的第 2、3 号叶片失谐系数相同, 叶片固有频率相同,可以将这 2 个相邻叶片看成整个

失谐系统的1个子系统,作为一个整体在整个系统中 发生局部化现象¹⁰。虽然第6、7、9号叶片的失谐系数 相同,但振动能量不同,在图4(d)的第32阶模态中 第6、7号叶片的应变能相近,而第9号叶片的应变能 与之相差很大,这是由于第8号叶片破坏了第6、7、9 号叶片作为1个子系统在整个系统中发生失谐。

此外,在发生强局部化的第23~35阶模态中,具 有最大相对应变能的2个模态(图4(e)、(f)),分别为 第5、7号叶片,而从表1中可见,第5、7号叶片是2 个失谐量最大的叶片。

因此,若相邻叶片的失谐量接近,使叶片固有频 率依次平滑过渡,整个结构就不会发生强烈的局部化 现象。

3.2 模态密度对失谐敏感性的影响

计算失谐叶盘结构与谐调叶盘结构对应阶次固 有频率的相对频差如图 5 所示。从图中可见,叶盘失 谐后,原本成对出现的频率发生频率分离现象¹⁷。根据 第 2 节定义的 3 种模态密度,模态密度越高,频率分 离现象越明显,对失谐的敏感性增强。



可以利用模态局部化因子的概念ⁿ定量描述模态 局部化程度,利用叶片应变能定义模态局部化因子 R_u=(E_m-E_t)/E_t (8) 式中;E_t 与 E_m分别为叶片失谐前后的应变能。

计算前 60 阶模态的模态局部化因子如图 6 所示。 以叶片振动为主的高模态密度区的模态局部化程度最 高,而轮盘振动为主的低模态密度区的模态局部化程 度最低,介于二者之间的中度模态密度区的模态局部 化程度居中。因此,模态密度越大,模态局部化程度越 高,对失谐的敏感性越强。



4 结论

(1)本文采用的子结构模态综合法计算结果与通 用有限元法计算结果能较好地吻合,在满足计算要求 的基础上可节约计算时间。

(2)频率相等或相近的相邻叶片在强局部化模态 中振动能量相当,作为一个整体,在整个系统中发生 模态局部化现象,叶片失谐量在叶片之间平滑过渡, 可以降低模态局部化程度。

(3)随着模态密度的增加,叶盘结构对失谐的敏 感性增强,模态局部化程度增强。

参考文献:

- Ewins D J. The effects of detuning upon the forced vibrations of bladed disks[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1969,9(1):65-79.
- [2] Marlin J. Kruse, Christophe Pierre. An experimental investigation of vibration localization in bladed disks, Part 1: free response[R]. ASME 1997-GT-501.
- [3] Hurty W C. Vibration of structural system by component mode synthsis [J]. American Society For Mechanical Engineering, 1960,85:51-69.
- [4] 张锦,刘晓平. 叶轮机振动模态分析理论及数值方法[M].北京:国防工业出版社,2001:84-125.
 ZHANG Jin, LIU Xiaoping. Theory and numerical method of turbine vibration modal analysis [M].Beijing: National Defence Industry Press,2001:84-125.(in Chinese)
- [5] 葛长闯,王建军,刘永泉. 失谐多级整体叶盘振动模态特性定量评价方法研究[J]. 航空发动机,2012,38(1):25-28,62.
 GE Changchuang, WANG Jianjun, LIU Yongquan. Quantitative assessment method of vibration mode characteristics for mistuned multistage blisk [J]. Aeroengine, 2012,38(1):25-28,62. (in Chinese)

- [6] Wei S T, Pierre C.Localization phenomena in mistuned assemblies with cyclic symmetry Part I : free vibrations[J]. American Society for Mechanical Engineering, 1988, 110:429-438.
- [7] 王建军,于长波,李其汉. 错频叶盘结构振动模态局部化特 性分析[J]. 航空动力学报,2009,24(4):788-792.
 WANG Jianjun, YU Changbo, LI Qihan. Localization characteristics of vibratory mode for bladed disk assemblies [J]. Journal of Aerospace Power, 2009,24(4):788-792. (in Chinese)
- [8] 廖海涛,王建军,王帅,等. 失谐叶盘结构振动模态局部化 实验[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1847-1854.
 LIAO Haitao, WANG Jianjun, WANG Shuai, et al. Test for localization of vibratory mode of a mistuned bladed disk assembly [J]. Journal of Aerospace Power, 2011,26 (8): 1847-1854. (in Chinese)
- [9] 王建军,姚建尧,李其汉. 刚度随机失谐叶盘结构概率模态 特性分析[J]. 航空动力学报,2008,23(2):256-262.
 WANG Jianjun, YAO Jianyao, LI Qihan. Probability characteristics of vibratory mode of bladed disk assemblies with random stiffness mistuning[J]. Journal of Aerospace Power,2008,23 (2):256-262. (in Chinese)
- [10] 王建军,许建东,李其汉. 失谐叶片 轮盘结构振动局部化的分析模型[J]. 汽轮机技术,2004, 46(4):256-259.
 WANG Jianjun, XU Jiandong, LI Qihan. Analytical models of mistuned bladed disk assembles-a review [J]. Turbine Technology, 2004,46(4):256-259. (in Chinese)
- [11] 李宏新,张连祥,王延荣,等. 风扇工作叶片振动可靠性评 估[J]. 航空发动机,2003,29(1):20-22.
 LI Hongxin, ZHANG Lianxiang, WANG Yanrong, et al. Estimaion of fan blade vibration reliability for a turbofan engine [J]. Aeroengine, 2003,29(1):20-22.(in Chinese)
- [12] 张原,郁大照,张浩然. 自由涡轮叶片 / 轮盘耦合振动特性 分析[J]. 航空发动机,2011,37(6):21-25.
 ZHANG Yuan, YU Dazhao, ZHANG Haoran. Analysis of coupled vibration characteristics of free turbine blade/disk[J]. Aeroengine, 2011, 37(6):21-25. (in Chinese)
- [13] 王红建, 贺尔铭. 叶片失谐对叶盘结构振动特性的影响[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(5):645-650.

WANG Hongjian, He Erming. Exploring key features of blade mistuning effects on vibration characteristics of bladed disks [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(5):645-650. (in Chinese)

- [14] 王延荣,田爱梅.叶/盘结构振动分析中几个问题的探讨
 [J]. 推进技术,2002,23(3):233-236.
 WANG Yanrong, TIAN Aimei. Several issues in the implementation of vibration analysis of bladed disk [J]. Aeroengine, 2002,23(3):233-236. (in Chinese)
- [15] 李益萱,贺尔铭,王红建,等. 叶盘结构频率转向特征的量化 分析研究[J]. 西北工业大学学报,2010,28 (5):764-768.
 LI Yixuan, HE Erming, WANG Hongjian, et al. Quantitative analysis of the frequency veering properties of a bladed disk
 [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010,28 (5):764-768.(in Chinese)