凸肩摩擦减振效果影响因素研究

张海洋,蔚夺魁,王相平
(中航工业沈阳发动机设计研究所,沈阳 110015)

张海洋(1988),男,硕士,主要从事航空发动机强度与结构设计工作。

收稿日期:2012-04-16

摘要:为了研究凸肩摩擦减振效果的影响因素,以带凸肩平板叶片为对象,利用数值模拟方法计算了平板叶片的振动响应,进行了初始紧度及凸肩接触面与振动方向夹角对凸肩摩擦减振的影响研究。分析了不同夹角和初始紧度时的 1 弯振动响应,得到凸肩接触面与振动方向夹角和初始紧度对减振效果的影响规律。结果表明:存在 1 个最优初始紧度,使减振效果达到最好;接触面与振动方向夹角越小振动越小,但需要综合考虑磨损和紧度变化情况。

关键词:凸肩叶片;振动;初始紧度;凸肩接触面与振动方向夹角

Influence Factors of Vibration Control by Frictional Constraints between Blade Shrouds

ZHANG Hai-yang, YU Duo-kui, WANG Xiang-ping
(**AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China**)

Abstract: In order to study the influence factors of vibration control of frictional constraints between blade shrouds, the vibration responses of plate blade were calculated by numerical simulation of plate blade with shrouds. The influences of the initial degree of tightness and the angle between shroud contact surface and the direction of blade vibration on the plate blades with shrouds were studied, which rules were obtained by analyzing the first bending mode vibration response in different angle and initial degree of tightness. The results show that there is a most excellent initial tightness to make the best effect of reduction vibration. A smaller angle between shroud contact surface and the direction of blade vibration means a lower vibration value, but friction and changes of tightness should be considered carefully.

Key words: blades shrouds; vibration; initial degree of tightness; angle between shroud contact surface and direction of blade vibration

0 引言

风扇叶片由于叶身较长且进口气动复杂,其振动问题比较严重,实际中应用凸肩结构来增加叶片刚度,并利用其接触面的干摩擦阻尼减小振动。国内外许多学者[1-12]对凸肩正压力、位置、接触角度和刚度等凸肩参数对于减振效果的影响规律进行了研究,但仅限于对凸肩接触面角的简单研究。

本文应用凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究[8]中提出的方法来计算叶片的摩擦力及非线性响应,模拟计算了带凸肩平板叶片不同初始正压力和凸肩接触面角情况下叶片的振动响应,分析了不同凸肩初始正压力和接触面与振动方向夹角对减振的影响规律,得到了振动响应随初始正压力和凸肩接触面与振动方向夹角的变化规律,为凸肩接触面角和初始间隙的选取提供了一定的参考依据。

1 数值模型

1.1 带凸肩平板叶片模型结构

为了研究凸肩接触面与振动方向夹角对振动响应的影响,建立不同凸肩接触面角的带凸肩平板叶片模型,如图 1 所示。模型结构参数中平板叶片高 240 mm,宽 40 mm,厚 3 mm;凸肩宽 20 mm,厚 3 mm,过渡段长 2 mm,接触面长 20 mm 保持不变,接触面角分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°。由于叶片为平板叶片,其 1 弯振动方向与轴向成 90°,所以凸肩接触

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

面与振动方向夹角分别为 90°、75°、60°、45°、30°、15°、0°,如图 2 所示。凸肩位置为沿叶高 175 mm,轴向为叶宽中心位置。不同接触面与振动方向夹角试验件如图 3 所示。不同结构凸肩接触面与振动方向夹角和凸肩自由时的 1 弯振动频率见表 1。

图 1　带凸肩平板叶片(45°)的有限元模型

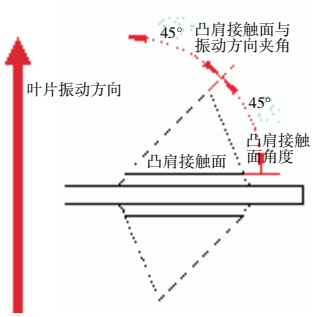


图 2　凸肩接触面与振动方向夹角 45°

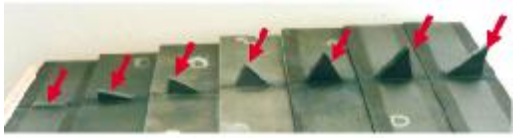


图 3　不同接触面与振动方向夹角试验件

1.2　凸肩接触非线性响应计算方法

在叶片响应的求解过程中,因摩擦导致计算过程存在严重的非线性。本文采用文献[8]中提出的计算方法,运用数值轨迹跟踪法计算出各频率下凸肩接触摩擦力,采用时频转换方法求解叶片的非线性响应,并应用史亚杰[12]根据上述计算方法编制的 MATLAB 程序来计算叶片的非线性响应。

表 1　不同结构凸肩自由情况的 1 弯频率及凸肩接触面与振动方向夹角

凸肩接触面角/(°)	凸肩接触面与振动方向夹角/(°)	1 阶弯曲振动频率/Hz
0	90	55.003
15	75	54.548
30	60	54.129
45	45	53.773
60	30	53.503
75	15	53.334
90	0	53.276

1.3　计算条件

本文主要研究不同凸肩接触面与振动方向夹角对叶片振动的影响,在计算过程中设置凸肩法向和切向接触刚度不变,接触面摩擦系数不变,激振力位置和大小不变。本文主要研究 1 弯振动的影响,设置叶尖为取值位置。

1.4　初始紧度对减振效果的影响

一般情况下,摩擦力的大小由施加的压力和摩擦面的摩擦系数决定,所以对于凸肩减振结构而言,施加在凸肩接触面上的初始正压力对凸肩减振的效果影响非常大,而初始正压力由结构的初始紧度决定。本文通过计算平板叶片在不同初始紧度时叶片的振动响应,研究初始紧度对凸肩减振效果的影响规律。

计算平板叶片的振动响应,取激振力为 2 N,摩擦系数 u=0.3,法向刚度 K_n=10 kN/mm,切向刚度 K_d=6 kN/mm,各模态阻尼参数为 0.003,保持激振力、接触点对位置不变,改变不同初始正压力,计算叶片的振动响应。不同初始紧度下叶尖 1 弯共振响应曲线如图 4 所示,X 轴为叶片的初始紧度,Y 轴为叶尖 Y 方向位移响应。不同初始紧度下叶尖 1 弯共振频率曲线如图 5 所示,X 轴为初始正压力,Y 轴为 1 弯振动频率。

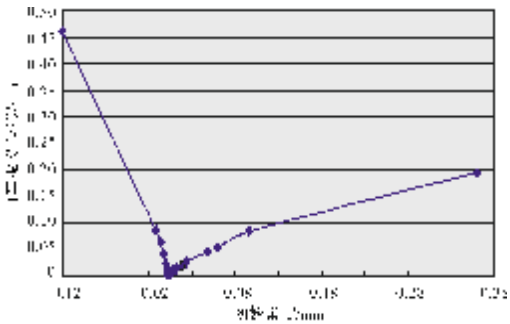


图 4　不同初始紧度下叶尖 1 弯共振响应曲线

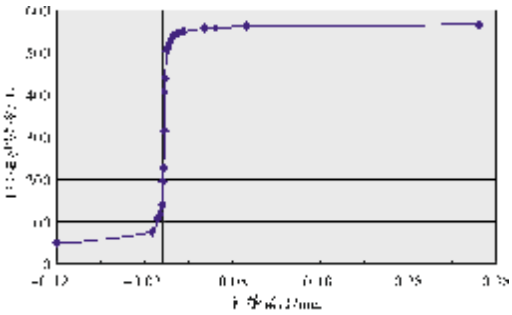


图 5　不同初始紧度下叶尖 1 弯共振频率曲线

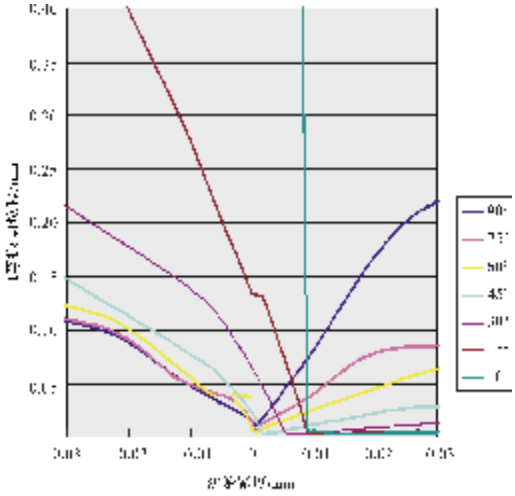
计算得到:随着初始紧度的增大,1 弯振动响应先减小后增大,即存在 1 个初始紧度,使 1 弯振动响应达到最小,减振效果最好,此时 1 弯共振频率表现为急速上升现象。这个初始紧度定义为最优初始紧度,对应的 1 弯振动响应为最小 1 弯振动响应。

1.5　凸肩接触面与振动方向夹角对减振效果的影响

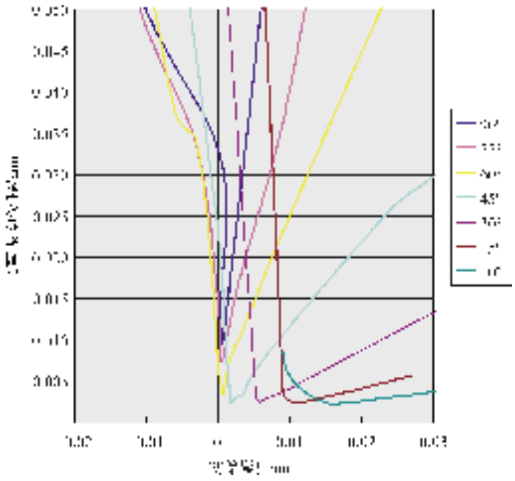
在工程计算中,涡轮叶片叶冠接触面与振动方向夹角是 1 个很重要的考虑参数。对于凸肩结构,其接触面与振动方向夹角对凸肩减振效果同样有很大影

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

响。本文计算不同凸肩接触面角模型在不同初始紧度条件下的 1 弯振动响应,分析不同凸肩接触面与振动方向夹角对凸肩减振效果的影响规律,不同凸肩接触面角模型和参数见表 1 并如图 3 所示。不同凸肩接触面与振动方向夹角模型 1 弯振动位移响应随初始紧度变化曲线及 Y 轴放大后的曲线如图 6 所示,X 轴为初始紧度,Y 轴为 1 弯振动位移响应。



(a)



(b)

图 6 不同凸肩接触面与振动方向夹角模型 1 弯振动位移响应随初始紧度变化曲线及 Y 轴放大后的曲线

由计算可知:(1) 凸肩接触面与振动方向夹角不同时,振动响应对初始紧度敏感程度不同。当初始紧度较小时, 接触面与振动方向夹角越小,1 弯振动响应越大,响应对初始紧度越敏感,随初始紧度增大,1 弯响应减小速率越大;当初始紧度较大时,夹角越大,1 弯振动响应越大,响应对初始紧度越敏感,随初始紧度增大,1 弯响应增加速率越大。(2) 从放大图可见,随着凸肩接触面与振动方向夹角减小,最优初始紧度增大。当夹角大于 60°时,随着夹角增大,最优初始紧度有所增大,但增加幅度很小。当夹角小于 60°时,随着夹角减小,最优初始紧度急剧增大。(3)从图 6 中可见, 随着凸肩接触面与振动方向夹角减小,最优初始紧度对应的最小 1 弯振动响应幅值减小,减振效果变好。当夹角大于 60°时,随着夹角增大,最优初始紧度对应的最小 1 弯振动响应幅值急剧增大,对角度变化非常敏感。当夹角小于 60°时,随着夹角减小,最优初始紧度对应的 1 弯振动响应幅值缓慢减小,对角度敏感度很小。

2 带凸肩平板叶片振动响应试验

针对平板叶片凸肩初始紧度与凸肩接触面 2 个设计参数, 进行带凸肩平板叶片振动响应测量试验,验证这 2 个参数对凸肩减振效果影响规律的正确性。试验系统如图 7 所示。

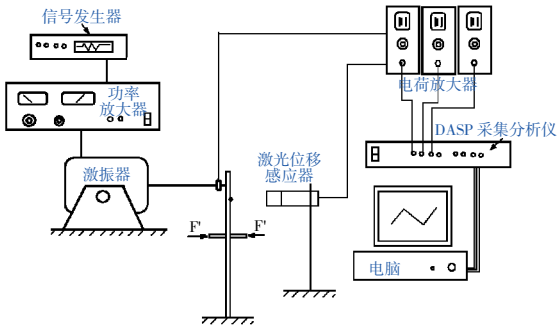
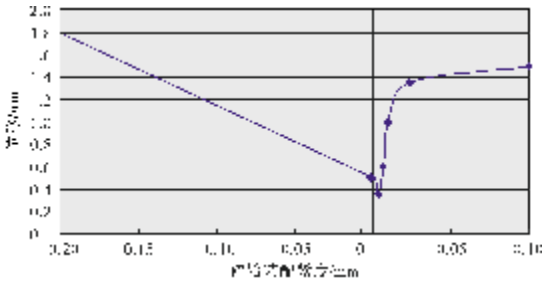


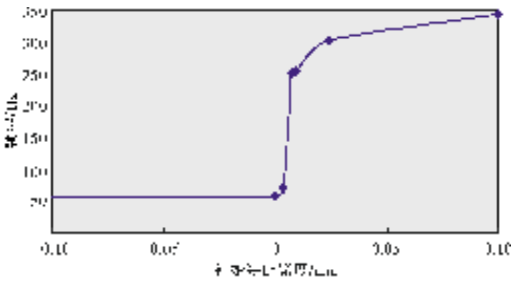
图 7 试验系统

分别针对不同结构模型试验件加载相同稳态激振力,设置不同的初始紧度,测量平板叶片的 1 弯振动位移响应。45°凸肩接触角模型 1 弯振动位移响应及共振频率随初始紧度变化曲线如图 8 所示,图中 X 轴为初始紧度,Y 轴为 1 弯振动位移响应和 1 弯共振频率。不同夹角模型 1 弯振动位移响应随初始紧度变化曲线如图 9 所示,初始紧度△=0 ~ 0.0096 mm 时的局部放大如图 10 所示, 图中 X 轴为初始紧度,Y 轴为 1 弯振动位移响应。



(a) 振动位移变化

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn



(b) 共振频率变化

图 8　45°凸肩接触角模型 1 弯振动位移响应及共振频率随初始紧度变化曲线

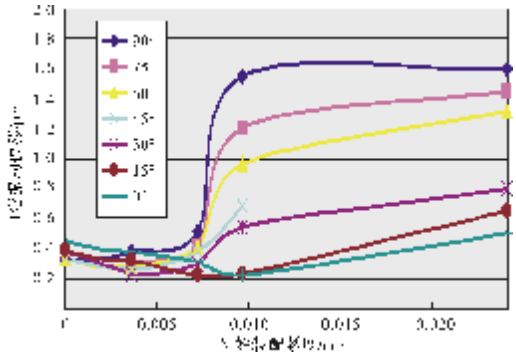


图 9　不同夹角模型 1 弯振动位移响应随初始紧度变化曲线

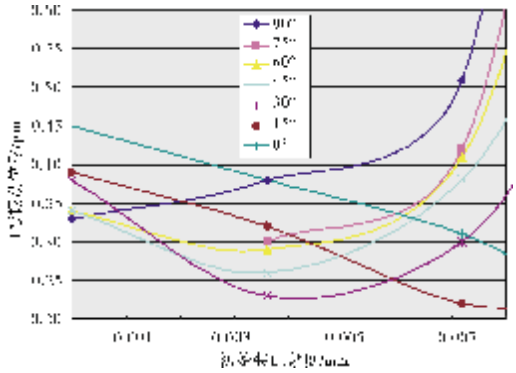


图 10　初始紧度△=0 ~ 0.0096 mm 时的局部放大

将试验结果与数值模拟结果进行对比得出:(1)随着初始紧度的增大,1 弯振动响应先减小后增大,存在 1 个最优初始紧度,使 1 弯振动达到最小,此时 1 弯共振频率急剧增大, 与数值模拟得到的规律一致。(2)当初始紧度较小时,接触面与振动方向夹角越小,响应越大。当初始紧度较大时,夹角越大,响应越小。随着凸肩接触面与振动方向夹角减小,最小 1 弯振动响应幅值减小,减振效果变好。但当夹角小于一定值时,响应减小幅度非常小,与数值模拟得到规律一致。

3　结论

本文针对不同凸肩接触面角的带凸肩平板叶片,利用数值模拟方法计算了平板叶片的振动响应,分析凸肩初始紧度和凸肩接触面与振动方向夹角对凸肩减振效果的影响规律。进行了带凸肩平板叶片振动响应试验,验证了理论计算结果的正确性。得到凸肩初始紧度与凸肩接触面与振动方向夹角对凸肩减振效果的影响规律如下:

(1)随着凸肩初始紧度的增大,叶片 1 弯振动响应先减小后增大,存在 1 个最优初始紧度,使 1 弯振动响应最小,此时 1 弯共振频率急剧升高。

(2)当初始紧度较小时,接触面与振动方向夹角越小,响应越大;当初始紧度较大时,夹角越大,响应越小。

(3)随着凸肩接触面与振动方向夹角角度减小,最优初始紧度增大。当夹角小于一定角度时,最优初始紧度增大幅度非常大。

(4)随着凸肩接触面与振动方向夹角减小,最小 1 弯振动响应幅值减小,减振效果变好。但当夹角小于一定值时,响应减小幅度非常小。

根据以上影响规律,总结得到凸肩接触面和初始紧度设计方法:在凸肩结构设计过程中,凸肩接触面与振动方向夹角应该越小越好,但是不能太小,需要考虑初始紧度整体变化和接触面磨损情况,建议接触面与振动方向夹角选择为 30° ~ 45°,并且凸肩初始紧度尽可能靠近最优初始紧度。

参考文献:

[1] 李宏新,赵开宁,张连祥. 航空发动机风扇叶片凸肩的结构设计[J]. 航空发动机,2004,30(4):14-17.
LI Hongxin, ZHAO Kaining, ZHANG Lianxiang. Structural design of mid-span shrouds for aircraft engine fan blades[J]. Aeroengine, 2004,30(4):14-17.(in Chinese)

[2] 黄致建. 某种低损伤阻尼凸肩的结构设计 [J]. 航空发动机, 1995(4):25-31.
HUANG Zhijian. Design of the damp shroud featuring low damage[J]. Aeroengine, 1995(4):25-31.

[3] 任勇生. 带凸肩叶片的稳态响应计算及其阻尼减振分析[J]. 振动工程学报,1994,175(2):103-111.
REN Yongsheng. Steady state response caculation and damping vibration analysis of shrouded blades [J]. Journal of Vibration Engineering, 1994,175(2):103-111. (in Chinese)

[4] Yang B D, Meng C H. Modeling of friction contact and its application to the design of shroud contact [J]. Transaction of ASME Journal Engineering for Gas Turbines (下转第 78 页)

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn