

文章编号: 1000-8055(2006) 01-0174-07

凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究 ——规律分析

单颖春¹, 朱梓根², 刘献栋¹

(1. 北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对带凸肩的平板叶片, 对凸肩阻尼结构的减振规律进行了系统的研究。获得了凸肩接触面初始正压力、接触角度、接触刚度、摩擦系数等多种参数对叶片非线性响应的影响规律。此外, 研究了某航空发动机带凸肩风扇叶片的振动响应, 分析了凸肩结构对其一阶弯曲振型及某高阶振型的减振效果, 确定了该叶片发生疲劳断裂的原因。本文工作对带凸肩结构叶片的设计、排故具有指导意义。

关键词: 航空、航天推进系统; 干摩擦; 凸肩; 非线性振动; 叶片

中图分类号: V 231. 9

文献标识码: A

Investigation of the Vibration Control by Frictional Constraints Between Blade Shrouds—Rule Analysis

SHAN Ying-chun, ZHU Zi-gen², LIU Xian-dong¹

(1. Department of Automobile Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The performance of shroud damper was investigated systematically by re-searching the nonlinear responses of plate blades with shrouds. The influences of many contact parameters such as initial normal force, contact angle, contact stiffness and coefficient of friction were obtained. Furthermore the vibration responses of an aero-engine fan blade were investigated. The effects of shroud on the first bending mode and a higher mode of the fan blade were analyzed, and the reason of blade fracture due to fatigue was determined. The results can be used to the design and the fault diagnosis of blades with shrouds.

Key words: aerospace propulsion system; dry friction; shroud; nonlinear vibration; blade

航空发动机风扇叶片经常采用凸肩结构以增加叶片间的干摩擦阻尼对其进行减振。凸肩结构

设计是否合理直接影响其减振效果。任勇生^[1]考察了凸肩接触角及凸肩位置对叶片振动响应的影

响。Meng^[2]研究了变化的凸肩接触正压力的影响。Yang^[3,4]分析了变法向正压力、接触角、初始正压力对叶片响应的影响。上述研究在接触模型上都做了各种假设,有的未考虑凸肩接触正压力的变化,有的未考虑切向运动与法向运动之间的相位差,有的对接触运动做了椭圆假设,这些假设易给响应计算带来较大误差。针对这种情况,本文应用“凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究-理论方法”^[5]一文中提出的求解非线性摩擦力的时域跟踪法和叶片非线性响应的时频转换方法为基本算法,计算凸肩接触面内发生三维接触运动时的摩擦力以及带凸肩叶片的非线性响应,对凸肩结构的减振规律进行了较为系统的分析。

1 带凸肩平板叶片非线性特性研究

1.1 带凸肩平板叶片模型结构

图1为带凸肩平板叶片有限元模型,为分析凸肩高度及凸肩接触角度的影响规律,建立了不同凸肩高度和不同凸肩接触角的叶片模型。所建叶片模型的主要几何参数如下:叶片高度为180 mm;凸肩厚度为2.5 mm;凸肩高度为100 mm,凸肩接触角为45°;凸肩高度为120 mm,凸肩接触角为15°、30°、45°和60°;凸肩高度为140 mm,凸肩接触角为45°。其中凸肩接触角为凸肩接触面与叶片轴线方向的夹角。

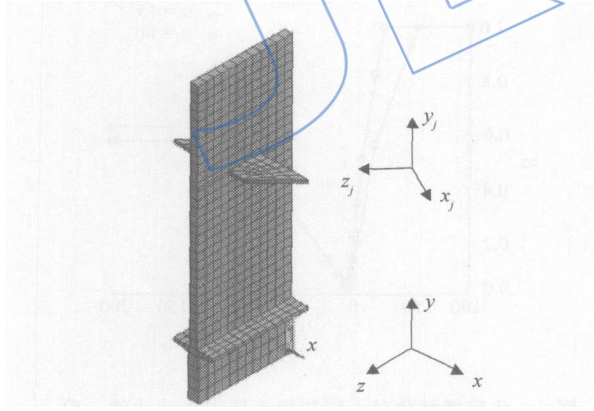


图1 带凸肩平板叶片结构

Fig. 1 The structure of the flat blade with shrouds

在不考虑凸肩接触面摩擦作用的情况下,应用ANSYS有限元软件对上述叶片模型的固有特性进行计算。本文主要讨论凸肩结构对平板叶片一阶弯曲振动的影响,故表1只给出所建各种带凸肩叶片一阶固有频率的有限元计算结果。假设整圈叶片为协调叶片,即相邻叶片的振动幅值相同,只相差一个相位差,考虑凸肩接触面的三维接

触运动,采用“凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究—理论方法”^[5]中提出的数值轨迹跟踪法计算凸肩接触摩擦力,并应用时频转换方法对叶片的非线性响应进行计算。

表1 不同凸肩参数下叶片一阶固有频率

Table 1 The first order natural frequency of the blade for different parameters of the shroud

凸肩高度/mm	接触角度/(°)	一阶固有频率/Hz
100	45	157.8
120	15	156.4
120	30	156.4
120	45	156.4
120	60	156.7
140	45	154.5

1.2 凸肩接触面初始压力的影响

本文通过计算带凸肩平板叶片在不同初始压力下的幅频响应分析初始安装条件对叶片振动的影响规律。图2为凸肩高度等于120 mm、凸肩接触角为45°叶片间振动相位差为45°、法向与切向接触刚度均为 5×10^2 N/mm、线性激振力为1.5 N、接触面摩擦系数等于0.5时不同初始正压力作用下叶片一阶弯曲振动的频响曲线。图中所示为叶尖在周向的振动。图2中初始压力的单位为N,初始压力为负值表示平板叶片在静止条件下相邻凸肩之间具有一定的间隙。由图2可见:

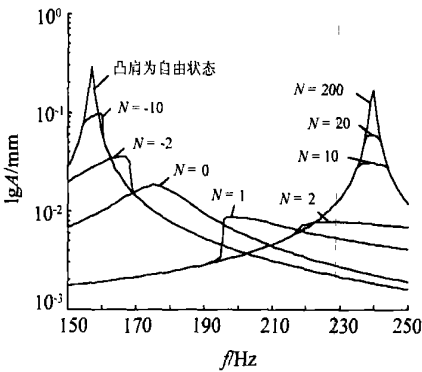


图2 不同初始正压力下叶片的一阶弯曲响应

Fig. 2 The first order bending response of the flat blade under different initial normal force

(1) 随着初始正压力由负值逐渐增为正值,凸肩接触面的3种初始状态分别为具有一定间

隙、刚刚接触无接触压力、接触无间隙并有一定压力。叶片一阶弯曲振动响应幅值先降后升,即存在一个最优的初始正压力使得叶片响应达到最小。

(2) 初始正压力为某一范围内的负值时,叶片的频响曲线表现为明显的硬特性,这是由于凸肩接触面之间在振动过程中包括分离状态和接触状态,随着叶片振动幅度的增加,一个振动周期中接触状态所占比例不断增加,使得系统表现出硬特性。初始正压力为某一范围内的正值时,叶片的频响曲线表现出软特性,这是由于凸肩接触面之间出现滑动状态导致的。

(3) 初始正压力为较大负值(即凸肩接触面间的间隙较大)时,叶片在整个振动周期内凸肩接触面完全不接触,此时凸肩无任何减振效果,叶片响应具有线性特征;当凸肩之间的初始正压力较大,即使在法向变载荷的作用下,叶片在振动过程中接触面也始终保持粘滞,凸肩结构只起到增加系统刚度的作用,不产生阻尼效果,叶片响应也具有线性特性。

1.3 凸肩接触角度的影响

凸肩接触角通过影响接触点间相对位移、非线性摩擦力而直接影响叶片的响应大小。图3、图4分别为凸肩接触角等于15°和60°时叶片一阶弯曲振动的频响曲线,其它接触参数:凸肩高度为120 mm、叶片间振动相位差为45°、法向与切向接触刚度均设为 5×10^2 N/mm、线性激振力为1.5 N、接触面摩擦系数等于0.3。由图3、图4可见,

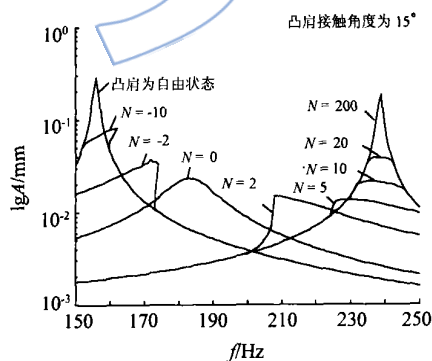


图3 凸肩接触角为15°时不同初始正压力下叶片的一阶弯曲响应

Fig. 3 The first order bending response of the flat blade under different initial normal force when contact angle of the shroud is 15°

当凸肩接触角较小(等于15°),初始正压力等于-10 N和-2 N时叶片频响曲线中均出现了多值

现象,而图4中相应初始正压力下叶片的非线性响应虽具有硬特性但未出现多值现象;当初始正压力等于2 N和5 N时,图3中叶片非线性响应所表现出的软特性也比凸肩接触角度等于60°时更加明显。产生这种现象的主要原因是当凸肩接触角度较小时,由叶片振动导致的接触面的法向正压力的变化幅度较大,叶片接触面在振动过程中的‘跳跃’现象更为突出,增加了响应的非线性程度。

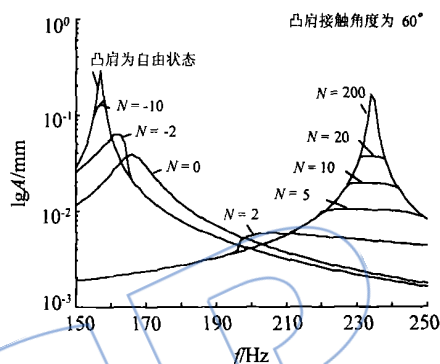


图4 凸肩接触角为60°时不同初始正压力下叶片的一阶弯曲响应

Fig. 4 The first order bending response of the flat blade under different initial normal force when contact angle of the shroud is 60°

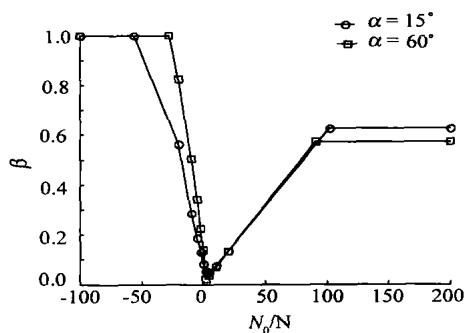


图5 凸肩接触角对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

Fig. 5 The effect of the shroud contact angle on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

图5为不同凸肩接触角度下,叶片的无量纲峰值响应 β 随初始正压力 N_0 的变化规律。无量纲峰值响应为不同初始正压力下叶片一阶弯曲振动峰值响应与凸肩全自由状态下叶片一阶弯曲振动峰值响应的比值。由图5可知,当初始正压力小于0即接触面具有初始间隙时,在相同的 N_0 下,

凸肩接触角越大叶片的峰值响应越大; 当初始压力较大, 接触面处于全固定状态时, 凸肩接触角较大减振效果好。在相同的 N_0 下, 凸肩接触角越大叶片的峰值响应越小。在最优初始正压力附近, 不同凸肩接触角对应的叶片峰值响应差别很小。

1.4 凸肩高度的影响

凸肩高度不同使得凸肩接触点各自由度的振型发生变化, 接触面的相对位移随之变化导致凸肩结构对叶片振动的减振效果发生变化。图 6 为凸肩高度等于 100, 120, 140 mm 时在不同初始正压力下平板叶片一阶弯曲振动峰值响应的变化规律。其它接触面参数同 1.3。

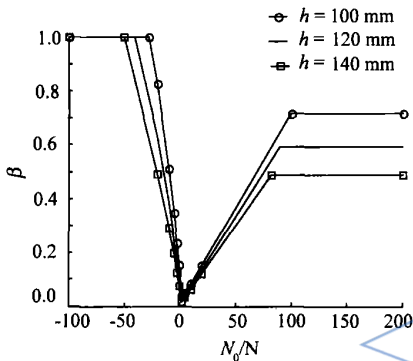


图 6 凸肩高度对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

Fig. 6 The effect of the shroud height on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

由图 6 可见, 不论初始压力为负值还是正值, 在相同初始压力下, 凸肩高度较高时, 叶片一阶振动的峰值响应较低, 减振效果越好。需要指出的是虽然增加凸肩高度可提高其对叶片一阶弯曲振动的减振效果, 但同时会增加凸肩离心力的大小, 增加叶片的静应力。因此在分析凸肩高度这一参数对叶片振动响应的影响时, 必须对多方面的因素综合考虑。

1.5 接触面刚度的影响

接触面法向刚度和切向刚度都直接影响接触点粘滞-滑动状态的转变条件以及接触非线性摩擦力的大小从而影响凸肩的减振效果。图 7 为不同切向刚度对叶片一阶弯曲振动峰值响应的影响; 图 8 为不同法向刚度对叶片一阶弯曲振动峰值响应的影响。其它接触参数同 1.2。

由图 7 可见, 当法向刚度相同, 不同切向刚度对初始正压力小于零时的振动峰值影响很小; 当

初始正压力大于零时, 相同初始正压力作用下, 切向刚度越大, 振动的峰值响应越小, 减振效果越好。由图 8 可见, 当切向刚度相同时, 不同法向刚度对初始正压力大于等于零时的振动峰值影响较小; 当初始正压力小于零时, 在相同的初始正压力作用下, 法向刚度越大, 振动峰值响应越小, 减振效果越好。

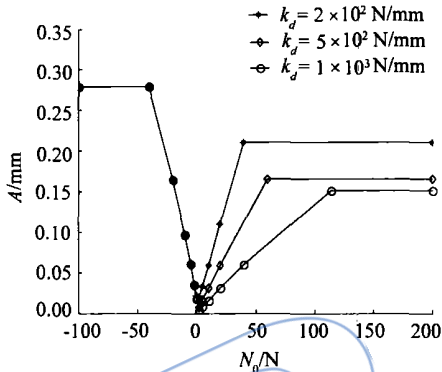


图 7 切向刚度对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

($k_n = 5 \times 10^2 \text{ N/mm}$)

Fig. 7 The effect of the tangent contact stiffness on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

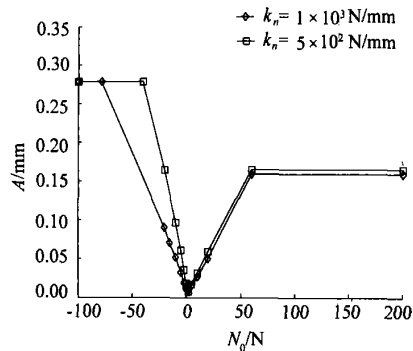


图 8 法向刚度对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

($k_d = 5 \times 10^2 \text{ N/mm}$)

Fig. 8 The effect of the normal contact stiffness on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

1.6 接触面摩擦系数的影响

任何时刻接触面能够提供的最大摩擦力均取

决于摩擦系数以及接触面对应时刻的法向压力,因此不同摩擦系数将影响接触状态发生改变的临界条件而影响接触摩擦力的大小,使凸肩产生不同的减振效果。图9为摩擦系数分别等于0.3和0.8时叶片一阶弯曲振动在不同初始正压力下峰值响应的计算结果。接触面其它参数同1.2。

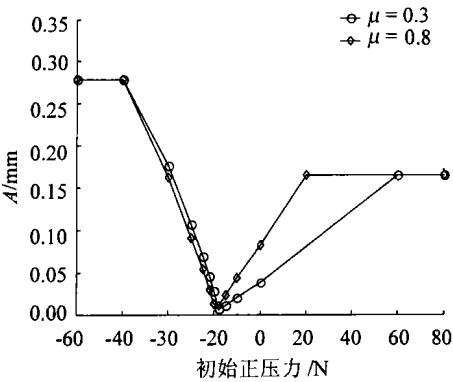


图9 摩擦系数对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

Fig. 9 The effect of the friction coefficient on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

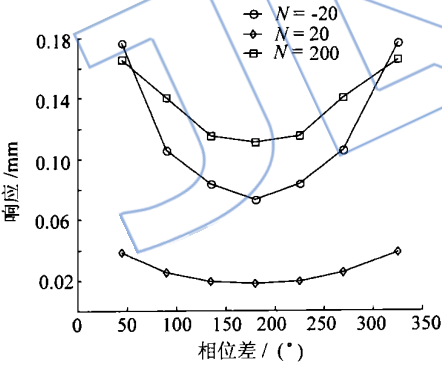


图10 相位差对不同初始正压力下叶片的一阶弯曲振动峰值响应的影响

Fig. 10 The effect of the phase between two blades on the response peak value of the blade first bending mode under different initial normal force

由图9可知,初始正压力小于最优正压力且振动过程中接触面发生接触时,在相同的初始正压力下摩擦系数越大,叶片的振动响应越小;在初始正压力大于最优正压力且接触面未达到全固定状态的情况下,若初始正压力相同,则摩擦系数越

小,叶片的振动响应越小,减振效果越好。

1.7 叶片振动相位差的影响

叶片间振动相位差的变化可使凸肩接触面间的相对位移发生改变而影响凸肩的减振性能。本文研究了叶片发生一阶弯曲振动时不同相位差对凸肩结构减振效果的影响规律,图10为相位差在45和325这一范围内变化时,初始正压力分别等于-20 N,20 N和200 N的情况下,叶片峰值响应的变化规律。由图10可知,叶片一阶弯曲振动的峰值响应都是在相位差等于180时最小,此外峰值响应曲线相对于相位差为180时对称。

除了分析上述不同凸肩接触参数对叶片振动幅值的影响之外,作者还分析了凸肩结构对叶片振动频率的影响以及对叶片不同振型的减振效果,因篇幅原因在此不一一给出,详见参考文献[6]。

2 某带凸肩发动机风扇叶片的非线性响应分析

发动机风扇叶片与平板叶片最大的区别就是其叶身是扭曲的,叶片的振型更加复杂,凸肩接触点各自由度振型之间的关系与平板叶片有较大的区别,三维接触振动的特征更加突出。在此针对某真实发动机风扇叶片分析其凸肩的减振效果。图11为该发动机一级风扇叶片的有限元网格结构图。

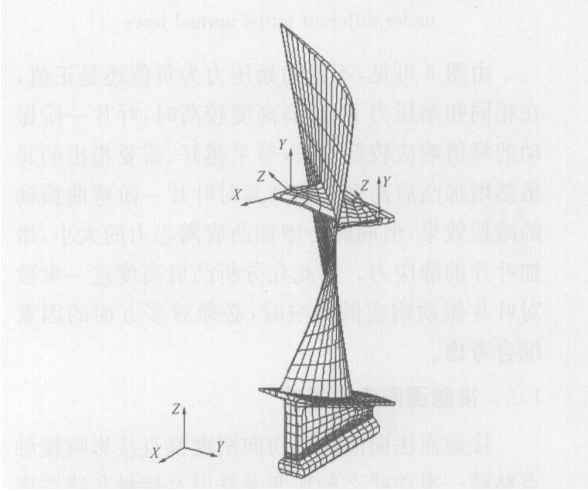


图11 某发动机带凸肩风扇叶片结构

Fig. 11 The structure of a fan blade of some aero-engine

根据测量结果,叶片一阶弯曲振动的共振频率在412 Hz~415 Hz这一较窄范围内,且叶片共

振时凸肩接触面间为紧固状态,故推知叶片在发生一阶弯曲振动时凸肩接触面接近或处于全固定状态。叶片一阶弯曲振动的共振转速为6160 r/min~6170 r/min,此时发动机的转速频率为102.7 Hz~102.83 Hz,故风扇叶片的一阶弯曲振动是被发动机转速频率的4倍频所激振。因该级叶片由28个叶片组成,故叶片发生一阶弯曲振动时叶片间的相位差为:
$$\psi=\frac{2\pi\times4}{28}=51.43^{\circ}$$
调整接触刚度使接触面在全固定时,叶片一阶弯曲振动的频率接近测量值412 Hz~415 Hz。

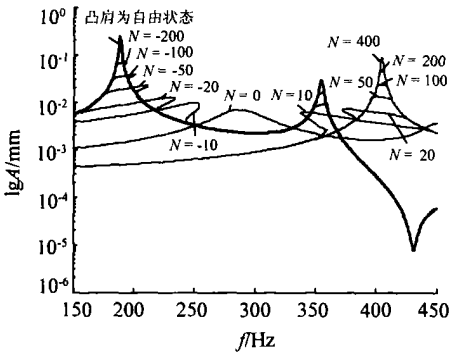


图 12 不同初始正压力下风扇叶片的一阶弯曲响应

Fig. 12 The first order bending response of the fan blade under different initial normal force

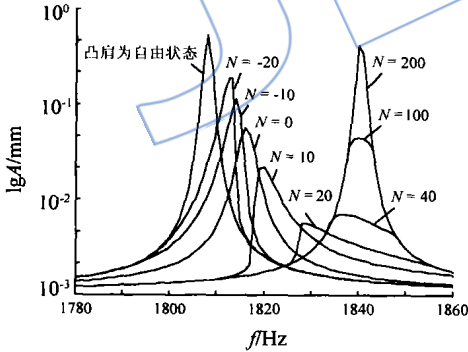


图 13 不同初始正压力下风扇叶片某高阶振型的响应

Fig. 13 A higher mode response of the fan blade under different initial normal force

图 12 为发动机风扇叶片一阶弯曲振动在不同初始正压力作用下叶尖前缘轴向振动响应的计算结果。由图 12 可知,凸肩结构对该风扇叶片一阶弯曲振动的减振效果非常好,即使是接触面处

于全固定状态,叶片响应也降到凸肩全自由状态时的40%左右。当接触面具有初始间隙或较小正压力时,风扇叶片响应具有明显的硬特性或软特性,但叶片响应的降幅都很大,凸肩结构表现出良好的减振效果。

图 13 为该发动机风扇叶片发生某高阶复合振动时在不同初始正压力作用下叶尖前缘轴向振动响应的计算结果。由图 13 可知对于该阶复合振型存在一最优初始正压力使叶片响应可以降低到凸肩全部分离时的30%左右,但当初始正压力较大时,凸肩处于全固定状态几乎不起任何减振作用。上述计算的高阶复合振型为该发动机叶片的故障振型,由发动机台架试验得知在故障振型下叶片凸肩的接触面恰好处于顶紧状态,即凸肩没有起到减振效果,这一试验结果与计算结果是吻合的。

3 结 论

本文以带凸肩平板叶片为分析对象,讨论了不同凸肩接触参数对叶片一阶弯曲响应的影响,并分析了凸肩结构对某发动机风扇叶片的一阶弯曲振型及某高阶振型的减振效果,得到以下主要结论:

- (1) 存在一最优凸肩初始正压力使叶片获得最佳减振效果,对于不同阶次的振动,最优正压力不完全相同。
- (2) 接触面具有初始间隙时,叶片的频响曲线表现为明显的硬特性;接触面具有较小初始正压力时,叶片的频响曲线表现出软特性。
- (3) 接触面有初始间隙时,凸肩接触角较小减振效果好,但响应非线性程度高;接触面接近全固定状态时,凸肩接触角较大减振效果好。
- (4) 增加凸肩高度、接触面法向刚度、切向刚度将降低叶片一阶弯曲振动的峰值响应。
- (5) 初始压力大于最优正压力且接触面未达到全固定状态的情况下,摩擦系数越小,凸肩的减振效果越好;反之摩擦系数越大,凸肩的减振效果越好。
- (6) 对于一阶弯曲振动,当叶片间的相位差为180时,凸肩的减振效果较好。
- (7) 凸肩对于某真实发动机风扇叶片一阶弯曲振动具有很好的减振效果。对某高阶故障振型当初始正压力较高时,几乎无减振效果,计算结果与台架实验时的状态相吻合。

参考文献:

- [1] 任勇生, 朱德懋. 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, 172(2): 103~111.
Ren Yongsheng, Zhu Demao. Steadystate Response Calculation and Damping Vibration Analysis of Shrouded Blades [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1994, 172(2): 103~111.
- [2] Meng C H, Griffin J H, Bielak J. The Forced Response of Shrouded Fan Stages[J]. *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 1986, 108: 50~55.
- [3] Yang B D, Meng C H. Modeling of Friction Contact and Its Application to the Design of Shroud Contact[J]. *Transactions of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119: 958~963.
- [4] Yang B D, Chen J J, Meng C H. Prediction of Resonant Response of Shrouded Blades with Three-Dimensional Shroud Constraint [J]. *Transactions of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, 121: 523~529.
- [5] 单颖春, 朱梓根, 刘献栋. 凸肩结构对叶片的干摩擦减振研究——理论方法[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 168~173.
Shan Yingchun, Zhu Zigen, Liu Xiandong. Investigation of the Vibration Control by Frictional Constraints between Blade Shrouds—Theoretical Method [J]. *Journal of Aerospace and Power*, 21(1): 168~173.
- [6] 单颖春. 叶轮机叶片干摩擦减振研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.