

文章编号: 1000-8055(2008)12-2177-07

宽弦空心风扇叶片流固耦合 作用下的叶片响应分析

王 营¹, 陶 智¹, 杜发荣¹, 郝 勇²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191;
2. 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 利用数值模拟的方法, 对宽弦空心风扇叶片在空气场作用下的瞬态响应进行了研究. 采用流固耦合数值计算方法, 得到了某宽弦空心风扇叶片在非定常边界条件下的变形响应. 计算结果表明, 叶片在空气场的作用下, 最大位移发生在叶片前缘叶尖处, 在沿叶展方向与叶片内部芯板结构沿叶展方向分布重合处产生应力集中, 应力值由叶片表面向叶片内部逐渐减小, 内部芯板虽然厚度较薄, 但分布应力值均较小, 且应力集中发生在叶片表面. 气动力与叶片结构之间的耦合作用, 使叶片结构模态振型沿周向不再均匀分布. 叶片在气固耦合时的变形响应以绕旋转轴的弯曲振动为主, 接近叶片的一阶模态变形.

关 键 词: 数值模拟; 宽弦空心风扇叶片; 流固耦合; 变形响应

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

Response analysis of fluid and solid coupling characteristics for a wide-chord hollow fan blade

WANG Ying¹, TAO Zhi¹, DU Fa-rong¹, HAO Yong²

(1. National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: By using the numerical simulation method, the transient response of a wide-chord hollow fan blade was investigated under the atmospheric flow field. The deformation response of the wide-chord hollow fan blade was obtained under unsteady boundary conditions with the fluid-structure interaction numerical simulation method. Computational results show that, under the action of the air flow field, the largest displacement occurs in the top of the front blade and the stress concentration is resulted from the superposition area along the spanwise direction including blade and core, with the stress decreased gradually from surface to inner of the blade. The stress concentration occurs in the blade surface while the distribution stress is relatively small and the core is relatively thin. The modal shape of the blade structure has not been well distributed along the circumferential direction due to the coupling effect between the aerodynamic force and the blade structure. When the fan blade is under fluid-solid coupling, the bending vibration is significant and close to the first-order vibration mode.

Key words: numerical simulation; wide-chord hollow fan blade;

收稿日期: 2007-09-01; **修订日期:** 2008-11-16

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0189)

作者简介: 王营(1973-), 女, 吉林长春人, 博士生, 工程热物理专业, 主要从事流固耦合数值计算方面研究.

风扇叶片是涡扇发动机最具代表性的重要零件,涡扇发动机的性能与它的发展密切相关.为适应现代航空发动机的需要,风扇叶片在材料、结构方面已改进许多.宽弦空心风扇叶片是英美等国 60 年代末开始研制的产品,使用宽弦空心风扇叶片具有叶弦宽,重量轻,吸收振动能力强的特点.一般可以减轻重量 10%~30%,降低制造成本 30%~50%,是未来风扇叶片发展的方向^[1].

高涵道比、高推重比的涡轮风扇发动机对宽弦空心风扇叶片而言,其应用越来越广泛,发动机对叶片提出了更高的要求,出现了一些新的技术问题需要加以研究和解决.作用于风扇叶片表面上的非定常力不仅将引起叶片振动和噪音,而且可能引起叶片断裂.从发动机结构完整性和可靠性的观点看,风扇叶片的振动响应是至关重要的问题.因此评估由强迫响应引起的风扇叶片高周疲劳(HCF)非常重要^[2].

宽弦空心风扇叶片的流固耦合问题属于弹性结构体(即风扇叶片)由于外部绕流的流体流动(即气体力的周期性),对叶片造成了强迫振动,致使叶片产生高周疲劳.因此,需要对风扇叶片进行流固耦合分析.由于计算流体力学(CFD)取得了长足的发展,非线性有限元分析法已相当成熟.流固耦合理论也从早期的线性化发展到了非线性阶段,Sayma 等人^[3]早已提出了非线性的流固耦合数值模型,即便理论和技术方面都有所突破,但要真正求解流固耦合问题还相当困难.一般的流固耦合问题可由其耦合方程来定义^[4],这组方程的定义域同时有流体域与固体域,而未知变量含有描述流体现象的变量及描述固体现象的变量.流固耦合实际是一种瞬态的相互作用.Kielb 等人^[5]针对亚音涡轮中叶片尾流激振的强迫响应进行了实验和数值模拟研究,结果显示振动响应对叶片表面非定常压力场是一种破坏干扰.

目前,国内对宽弦空心风扇叶片的数值研究工作,所取得的研究成果非常有限.在文献^[6]中,杨雯、杜发荣、郝勇等人对宽弦空心风扇叶片的动力响应特性进行了研究.在线性段,验证了风扇叶片结构的合理性.本文通过使用 ANSYS 有限元软件^[7],采用了准确的物理模型和高精度的数值算法,对宽弦空心风扇叶片在空气场作用下的结构进行了瞬态动力学分析,即对风扇叶片进行了直接耦合的数值计算,确定了叶片疲劳源的位置

以及叶片产生破坏的原因,为下一步改进风扇叶片的结构以及对工程实践中叶片事故分析和设计安全性评估均有一定参考价值.

1 理论基础

处于介质中的弹性结构在受到动载荷作用时将会产生振动,这种振动通过对界面的激励,在介质中产生附加的动压力,而该附加动压力又通过界面再度引起结构的动力响应,这种过程称为结构和介质的耦合响应^[8].对于宽弦空心风扇叶片,由于其材料为钛合金,因此可以把它当作弹性体结构处理.叶片的工作环境是在大气中,所处介质为空气.所以宽弦空心叶片的耦合响应为空气与叶片之间的气固耦合.

在气固耦合的区域,气体对风扇叶片的压力改变了叶片振动的模态,而后者反过来影响流场的分布.在气固交界处气体和弹性体具有相同的速度和压力,这是进行流固耦合分析的物理条件.求解流固耦合问题需对结构控制方程和流体控制方程进行耦合求解.

1.1 叶片及空气的运动方程

1.1.1 叶片的运动方程

叶片的结构阻尼已经包含在材料本构方程中,求解叶片的运动方程时,可以不考虑作用在叶片上的阻尼.用实体单元对叶片进行离散化后,得到叶片的运动平衡方程,对运动平衡方程进行模块化处理,叶片(不考虑空气作用)的运动方程式为

$$\begin{pmatrix} M_{bb} & M_{cc} \\ M_{cb} & M_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{bb} & K_{bc} \\ K_{cb} & K_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_b \\ F_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $u_b(t)$ ——叶片表面上的广义坐标分量 u_b 上的位移分量,简记为 u_b ;

$u_c(t)$ ——叶片内部的广义坐标分量 u_c 上的位移分量,简记为 u_c ;

M_{ij} ——只在广义坐标 u_i 上有单位加速度(而在其他广义坐标上的加速度为零)时,在广义坐标 u_i 上所需的广义质量, $i, j = b, c$;

K_{ij} ——只在广义坐标 u_i 上有单位位移(而在其他坐标 u_i 上的位移为零)时,在广义坐标 u_i 上所需施加的广义力, $i, j = b, c$;

F_b ——作用在叶片表面上的广义力;

F_c ——作用在叶片内部的广义力.

1.1.2 空气的运动方程

根据叶片的结构特点,用三维实体单元对其进行有限元划分.对于不可压缩、有势的、粘性不起主要作用的气体,与叶片相互作用的周围气体也采用相同类型的单元进行离散,并假设其中气体压力是独立变量,叶片周围气体的运动方程为

$$\begin{pmatrix} \bar{L}_{ff} & \bar{L}_{fw} & \bar{L}_{fi} \\ \bar{L}_{wf} & \bar{L}_{ww} & \bar{L}_{wi} \\ \bar{L}_{if} & \bar{L}_{iw} & \bar{L}_{ii} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_f \\ p_w \\ p_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_f \\ F_w \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 $\bar{L}_{ij}$ ——对应两个轴的广义惯性矩阵模块,用来描述气体模块内各点质量分布状况;

p_f 气体自由表面广义压力分量;

p_w 气体与周围物体相互作用表面广义压力分量;

p_i 气体惯性广义压力分量;

F_f 作用在气体自由表面的广义力;

F_w 作用在气体与周围物体相互作用表面上的广义力.

在气体的运动方程中,空间未扰动位置的广义压力分量随扰动位置的变化而变化.因此,根据气体自由表面位移 u_f ,可以得到气体自由表面压力 p_f

$$p_f = \rho g u_f \quad (3)$$

式中 ρ ——气体密度.

令 $K_f = \rho g A_{ff}$,在其两边同乘 $A_{ff}^T K_f^T A_{ff}$,再对时间两次微分得到

$$\begin{pmatrix} A_{ff}^T & M_{ff} \end{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_f = 0 \quad (4)$$
$$M_{ff} = A_{ff}^T K_f^T A_{ff}$$

式中 A_{ff} ——自由表面矩阵;

M_{ff} ——自由表面质量矩阵.

又由于周围气体自由表面上的广义压力、广义位移之间的关系: $p_{ff} = -A_{ff}^T \ddot{\mathbf{u}}$,从上述(3)、(4)

式中,(2)式可以简化为

$$\begin{pmatrix} M_{ff} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{p}_f \\ \ddot{p}_w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{ff} & L_{fw} \\ L_{wf} & L_{ww} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_f \\ p_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_f \\ F_w \end{pmatrix} \quad (5)$$

1.2 空气与叶片的气固耦合运动方程

在叶片与其周围气体相互作用的界面上,作用在周围气体上的广义力与叶片表面的位移有关.

$$F_w = A_{bw}^T \ddot{\mathbf{u}} \quad (6)$$

式中 A_{bw} ——接触表面矩阵.

与此类似,叶片周围气体作用在叶片表面上的广义力为

$$F_b = A_{bw} p_w - K_g u_b \quad (7)$$

式中 K_g ——重力刚度矩阵.

叶片在工作转速下,由于离心力 K_{bb} 远远大于重力 K_g ,故而 K_g 可以忽略.组合(1)式和(5)式可得到气固耦合运动方程

$$\begin{pmatrix} M_{ff} & -A_{bf}^T & 0 \\ 0 & M_{bb} + m_{bb} & M_{bc} \\ 0 & M_{cb} & M_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{p}_f \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{L}_{ff} & 0 & 0 \\ A_{bf} & K_{bb} & K_{bc} \\ 0 & K_{cb} & K_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_f \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

2 空气与叶片的有限元网格划分

2.1 几何模型

本算例分析所用的几何模型,流体采用叶栅形状,叶片为中空结构,内含波浪形截面的芯板,榫头部分采用圆弧形榫齿与叶片座相连.在盘片系统的计算中,由于其在结构上有很好的循环对称性,可以取循环对称结构的一个基本扇区进行建模(如图 1 所示).

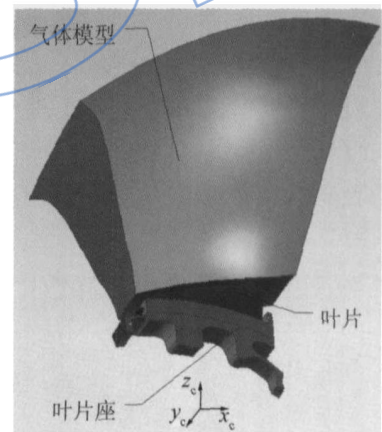


图 1 风扇叶片流固耦合模型

Fig. 1 Model of fan blade and couple-field

2.2 有限单元类型的选取

对图 1 中的几何模型进行有限单元的离散化,获得有限元模型,根据实际的工况条件进行边界条件的简化和设置.对于板长或板宽与板厚之比超过 10 的叶片芯板结构,可采用二维薄板单元进行网络划分.对于叶片结构,由于压气机叶片外部形状的特殊性,与周围气体耦合时采用三维 8 节点实体单元 Solid45 来进行离散,便于耦合条件的处理.叶片与周围气体采用相同的 Solid45 单元类型来进行离散,气体和叶片的离散有限元模型分别如图 2、图 3 所示.通过图 4 断面图能看

出宽弦叶片芯板的有限元模型. 通过对图 1 中的几何模型进行网格划分后得到叶片和空气流场节点总数为 29 516,单元总数为 80 304,其中六面体单元为 10 789,四面体单元为 69 515.



图 2 空气流场有限元模型
Fig. 2 Model of atmospheric flow field and FEM

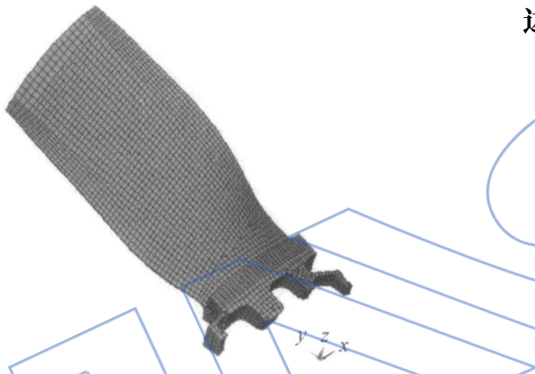


图 3 叶片的有限元模型
Fig. 3 Model of fan blade and FEM

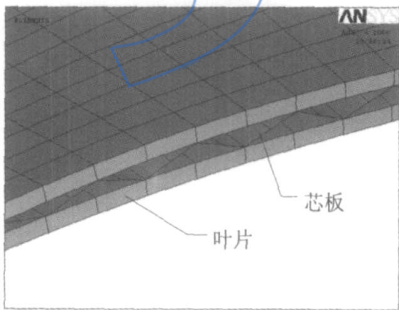


图 4 宽弦叶片芯板断面图
Fig. 4 Model of fan blade interlayer and section

3 流固耦合场边界条件

流固耦合计算涉及空气场的非定常计算和叶片结构的瞬态动力学分析. 在本次算例中所采用的工况条件为,平均统计法:发动机点火-加速-起飞-爬升-巡航-降落-熄火,作为一个事件. 各阶段的负荷权重如下表 1.

表 1 各阶段的负荷权重
Table 1 Weight of each phase load

工况	加速	起飞-爬升	巡航	降落熄火	熄火
权系数	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1

3.1 空气流场边界条件

对空气场边界条件设置如下,入口:初始叶片转速为零,气流速度为零,5 min 后叶片加速至 11 000 r/min. 气流速度 $v_1 = 6 \text{ m/s}$,压力 $p_1 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ MPa}$; 出口:压力 $p_2 = 1.6 \times 10^{-6} \text{ MPa}$. 在空气流场与叶片表面耦合部分,设置为壁面以及无滑移条件. 在除了入口、出口以及叶片壁面之外的初始条件均设置为速度为零. 整个空气场添加了边界条件及初始条件后的模型如图 5 所示.

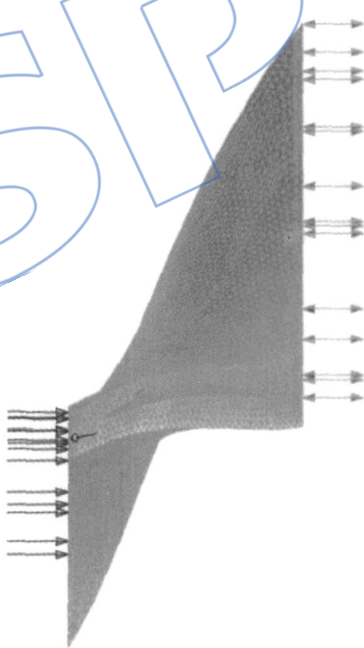


图 5 空气流场的边界条件
Fig. 5 Boundary condition of atmospheric flow field

3.2 叶片模型边界条件

宽弦空心风扇叶片材料为钛合金 TC4,其弹性模量 $E = 1.068 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\mu = 0.32$,密度 $\rho = 4.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,转速 $\omega = 11\,000 \text{ r/min}$. 对叶片座的两侧,施加 x, y, z 三个方向的位移约束,叶片与空气场接触的表面,通过添加流固耦合界面 FSI,模拟叶片与空气的相互作用. 整个叶片边界条件如图 6 所示.

3.3 流固耦合场边界条件

直接耦合是通过在流体和固体相互作用的表

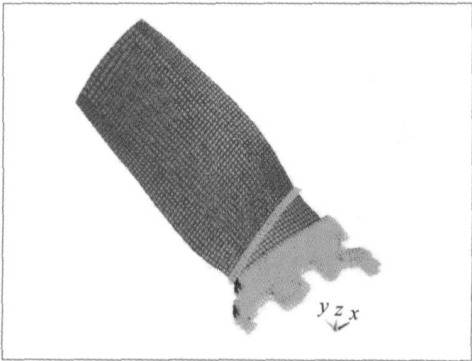


图 6 叶片的边界条件
Fig. 6 Boundary condition of fan blade

面,设置交互界面选项 FSI,通过交互界面来进行载荷和位移的实时传递,从而来模拟流体与固体之间的相互耦合的作用.在进行了耦合后的边界条件如图 7 所示.

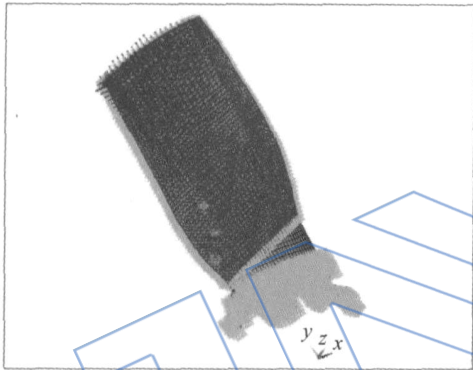


图 7 考虑了流体作用的耦合场边界条件
Fig. 7 Boundary condition of couple field

4 计算结果与分析

4.1 叶片的位移分布云图

从图 8 中可以看出,在工作状态,由于宽弦空心风扇叶片受到气流冲击和离心力的作用,在 A 处,即叶片的叶尖处速度最高,因此,叶片的最大位移位于叶尖处(A 处),由 B 处和 C 处的位移值可以看出,位移沿径向逐渐降低,在质心以下接近叶片座处,即叶片 D 处,位移为零.

根据文献^[6]对宽弦空心风扇叶片动力响应特性研究可知,叶片在气固耦合时的变形响应以绕旋转轴的弯曲振动为主,接近叶片的一阶模态变形,其中以叶片叶尖前缘(A 点)变形位移最大,振动频率接近叶片的一阶固频.这充分说明了一阶固有频率和振型在叶片响应变形中起主导作用,同时一阶振动模态的局部化也是该叶片产生疲劳破坏的主要原因.

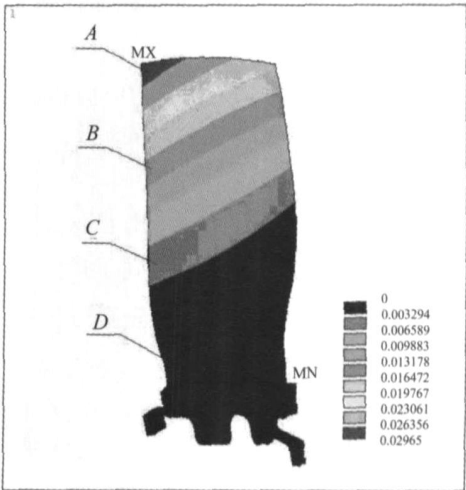


图 8 叶片的位移分布云图
Fig. 8 Plot of displacement

4.2 叶片的应力应变场分布云图

在图 9~10 中,可以分析出,叶片表面应力应

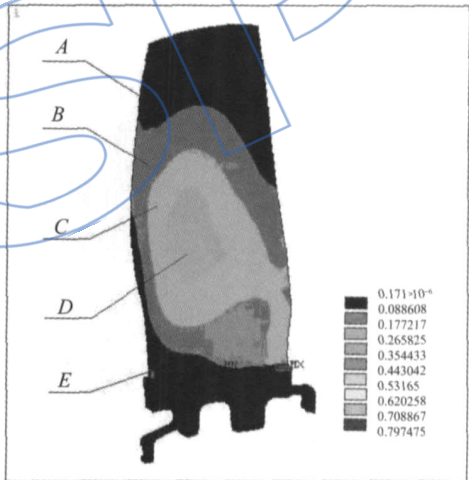


图 9 叶片的应力分布云图
Fig. 9 Plot of stress

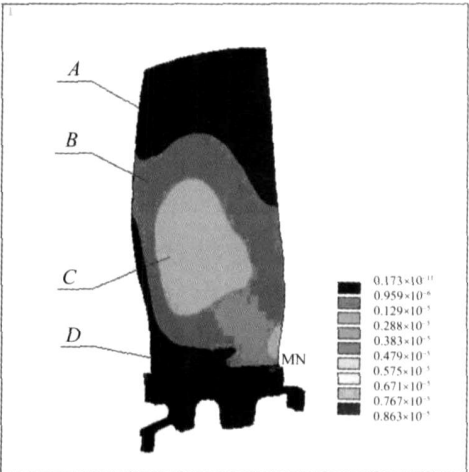


图 10 叶片的应变分布云图
Fig. 10 Plot of strain

变沿外环向质心处逐渐增大,并且在质心处达到最大.在图 9 中,根据对叶片的 5 个区域的计算结果分析,可以看出,A 与 E 区域的应力值最低,接近于零,B,C,D 区域应力值逐渐增大,并且应力值在 D 区域达到了最大.在图 10 中,A 区域与 D 区域的应变值最低,接近于零,B,C 区域应变值逐渐增大,且应变值在 C 区域达到了最大.

4.3 叶片断面应力应变场分布云图

在图 11 中,对叶片 A,B,C 三处分析计算结果,可知,在 A 区域叶片应力值最高,C 区域次之,B 区域,即叶片波浪型芯板处应力值最低,接近于零.在图 12 中,对叶片的应变计算结果分析,在 B 区域,即叶片波浪型芯板处,应变值最低,接近于零,A 区域与 C 区域应变值相对高一些.根据计算结果来看,叶片的波浪型芯板处应力应变分布值均比较低,由此可见,叶片波浪形芯板结构较好的保持了叶片的刚度,也大大减轻了叶片的重量.

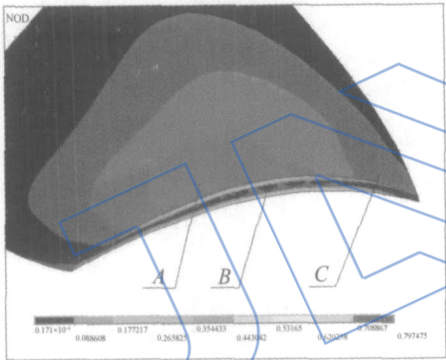


图 11 叶片断面应力分布云图
Fig. 11 Plot of stress of interlayer and section

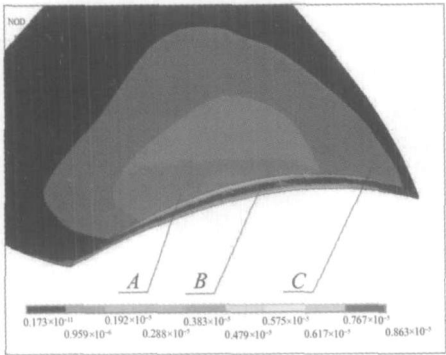


图 12 叶片断面应变分布云图
Fig. 12 Plot of strain of interlayer and section

4.4 叶片的危险点位置

当叶片转速增加到一定程度时,旋转预应力影响将超过振动应力的影响,最大应力值将转移

到叶片前缘叶根处.从图 13 中可以分析出,叶片的危险点位于叶片根部与叶片座的接触界面的内侧,即图 13 中的 A 区域应力应变值均为最大值,B 区域次之.这是由于叶片绕旋转轴转动的时候,由于离心力和叶片本身惯性力的作用,而叶片又受到叶片座的约束,故而此处应力应变值均为最高,是整个叶片的危险点.

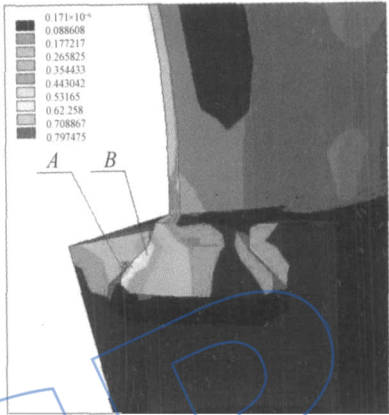


图 13 叶片的危险点位置
Fig. 13 Location of dangerous point

由以上计算结果可以分析出,在叶片的工作状态下,叶片等效应力最大值为 0.7975 MPa,等效应变最大值为 0.863×10^{-5} ,根据叶片材料 TC4 可知,该叶片的抗拉强度是 902 MPa,屈服强度是 824 MPa,由此可见,叶片整体应力应变值都较低,所有应力集中均发生在叶片表面,应力值由表面向内部逐渐减小.内部芯板虽然厚度较薄,但分布应力值均较小,不易发生破坏.

叶片在多物理场的复合作用下,主要是在空气流场和离心力的作用下,叶片的变形为复合变形,既有扭转变形,又有弯曲变形.此外,在叶片高速旋转时的离心作用使得前缘叶根处也成为应力集中的区域.

根据文献[6]以及本文计算结果可知,叶片在空气场的作用下,叶片在沿叶展方向(如图 9 中的 B,C,D 处) 150~200 mm 处开始产生较大位移变形,且叶片的空心加芯板部分沿叶展方向分布在沿叶展方向 30~290 mm 处,故两者重合部分易产生应力集中,导致叶片破坏,后续的试验也证明了预测的正确性.

根据以上对宽弦风扇叶片气固耦合的理论分析以及数值计算研究,可以得出,通过建立风扇叶片和空气流场的准确的物理模型,运用了直接耦合的数值计算方法,对宽弦风扇叶片在空气场作用下的气固耦合响应进行了数值计算,比较深入

的研究了宽弦风扇叶片气固耦合问题的机理,同时叶片采用了空心结构,计算结果证明该芯板结构是合理的,因此具有很好的工程实际意义。

5 结 论

1) 建立了宽弦空心风扇叶片以及空气场的物理模型,使用直接耦合来计算宽弦风扇叶片的气固耦合响应,并且判断出叶片危险点的位置。

2) 叶片在空气场的作用下,最大位移发生在叶片前缘顶端,且位移沿叶片径向逐渐减小,在叶片质心以下接近叶片座部位,位移为零。

3) 叶片表面应力应变值由外环向质心处逐渐增大,并且在质心处达到最大。所有应力集中均发生在叶片表面,应力值由表面向内部逐渐减小。内部芯板虽然厚度较薄,但分布应力值均较小,不易发生破坏。

4) 叶片绕旋转轴的弯曲振动变形规律以及叶片空心加芯板的结构决定了叶片应力集中发生在内含芯板的叶盆中心某处,是叶片产生疲劳破坏的位置。

5) 综合以上分析结果,可以得知,该风扇结构是合理的,为大涵道比涡扇发动机宽弦空心风扇叶片的气动、结构、强度寿命分析提供技术基础。下一步宽弦空心风扇叶片的高周疲劳预测奠定了基础。

参考文献:

- [1] 梁春华,杨锐. 航空发动机宽弦空心风扇叶片的发展及应用[J]. 航空发动机, 1999(2): 54-58.
- LIANG Chunhua, YANG Rui. Development and application of wide-chord hollow fan blade of aeroengine [J]. Aeroengine, 1999(2): 54-58. (in Chinese)
- [2] 陈懋章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 1-15.
- CHEN Maozhang. Development of fan/compressor techniques and suggestions on further researches[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 1-15. (in Chinese)
- [3] Sayma A I, Vahdati M, Imregun M. An integrated non-linear approach for turbomachinery forced response prediction. Part I: Formulation [J]. Journal of Fluids and Structures, 2000, 14: 87-101.
- [4] Zienkiewicz O C. Coupled problems and their numerical solution[M]// Lewis RW, Bettess P, Hinton Eeds. Numerical Methods in Coupled Systems. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1984.
- [5] Kielb J J, Abhari R S, Dunn M G. Experimental and numerical study of forced response in a full-scale rotating turbine [R]. ASME 2001-GT-0263, 2001.
- [6] 杨雯,杜发荣,郝勇,等. 宽弦空心风扇叶片动力响应特性研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 444-449.
- YANG Wen, DU Farong, HAO Yong, et al. Investigation of dynamic response property of wide-chord hollow fan blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 444-449. (in Chinese)
- [7] 赵海峰,蒋迪. ANSYS 8.0 工程结构实例分析[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
- ZHAO Haifeng, JIANG Di. Example analysis of engineering structure on ANSYS 8.0 [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [8] 王珺成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- WANG Maocheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)