

文章编号: 1000-8055(2007)06-1002-05

等强度低损失阻尼凸肩的设计与应用

黄致建¹, 郝艳华¹, 张峻峰², 赵普扬²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 泉州 362021;

2. 中国航空工业第一集团公司 沈阳航空发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对航空发动机叶片阻尼凸肩的工作特点, 建立一种具有等强度、流线型凸肩型面的凸肩结构设计方法, 并将该方法成功的应用于某高转速风扇叶片阻尼凸肩的结构设计中. 应用结果表明, 其设计方法工程实用性强, 设计的凸肩结构具有重量轻、凸肩流道光滑、气流损失小、可靠性高等特点.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 叶片; 阻尼凸肩; 结构设计; 等强度; 低损失

中图分类号: V232. 4

文献标识码: A

Design and application of the damp shroud featuring equal strength and small loss

HUANG Zhi-jian¹, HAO Yan-hua¹, ZHANG Jun-Feng², ZHAO Pu-yang²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation,

Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

China Aviation Industry Corporation I, Shenyang 110015, China)

Abstract: In accordance with the working characteristics of damping shroud for aero-engine blade, a kind of design method for blade shroud featuring streamline airfoil and equal strength has been established, and successfully applied to the structure design of the high-rotating shrouded fan blade. The result demonstrated the practicability of this method, with which the shroud structure designed has the features of light weight, smooth flow path, small loss of airflow, and high reliability etc.

Key words: aerospace propulsion system; blade; damp shroud; structure design; equal strength; small loss

在许多大涵道比航空发动机的风扇叶片上或在某些发动机的高、低压前 1 和 2 级转子叶片上, 为了避免发生危险的共振、颤振以及提高叶片的抗外物损伤能力, 在叶身上常设计一对用于减振和提高叶片支承刚性的阻尼凸肩(见图 1)。一圈叶片装好后, 阻尼凸肩连接成一环状(见图 2), 彼

此制约, 增强刚性, 并可以改变叶片的振动频率, 降低叶身根部的弯曲和扭转应力^[1]。

凸肩虽然具有诸多优点, 但由于凸肩位于压气机气流通道内, 其结构形状、布局直接影响发动机级效率、叶片强度, 所以凸肩结构设计需从强度和气动两个方面考虑。

收稿日期: 2006-05-18; 修订日期: 2006-10-23

作者简介: 黄致建(1956-), 男, 福建莆田人, 研究员, 硕士, 曾从事航空发动机压气机机构设计 20 余年, 现主要从事机械优化设计、虚拟仿真研究。

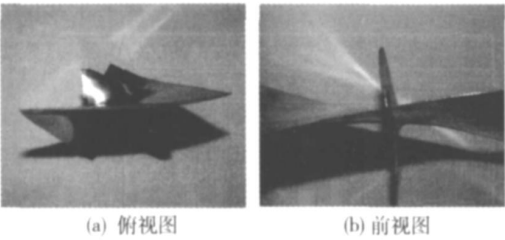


图 1 带低损失阻尼凸肩的叶片实物
Fig. 1 Shrouded blade with low loss damping

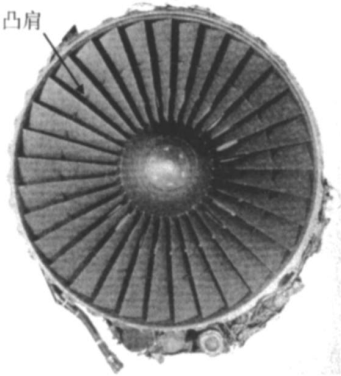


图 2 整级带凸肩风扇
Fig. 2 Shrouded fan assembly

从强度方面考虑,由于凸肩在叶身的位置较高,所产生的离心负荷不仅会使凸肩根部产生较大的弯曲应力,同时会给叶片带来较大的额外负荷.因而凸肩形状、质心位置是影响叶片静强度的关键,尤其是对于高转速的叶片.

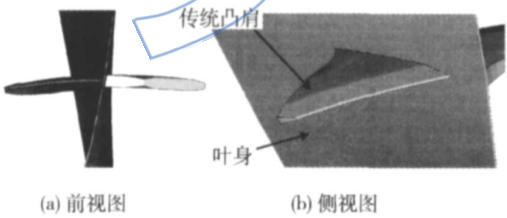


图 3 传统阻尼凸肩局部放大图
Fig. 3 Local enlarged drawing of the traditional damping shroud

传统的凸肩结构,上下表面为等厚环面或平行平面,前、后缘为楔形面(见图 3).因凸肩沿周向等厚,且为悬臂结构,在离心力作用下,最大应力只能出现在凸肩根部,容易形成根部应力集中,造成凸肩断裂故障,若需降低应力,只能增加凸肩厚度,从而使凸肩质量大大增加.采用等强度凸肩设计,可使凸肩应力分布均匀,充分利用材料,减小不必要的离心载荷,并可方便的调整凸肩根部

厚度,比如将高应力区调离凸肩与叶身转接处,使其根部具有较小的应力集中等.因此,采用等强度设计方法可以得到凸肩结构的最佳设计方案.

从气动性能方面考虑,由于阻尼凸肩的存在,不仅会减小空气流量,而且会造成气流压力损失,若凸肩表面采用非流线型设计(如图 3),这种损失还会增大.因此,改进凸肩的结构设计,降低凸肩损失,已成为许多先进发动机发展和改进设计的一项重要工作,如 CFM56 系列发动机的改进型 CFM56-5 发动机上,风扇叶片的凸肩就采用了低损失阻尼凸肩结构.

文中介绍的凸肩结构由于采用了流线型凸肩型面和变厚度设计(见图 4),具有良好的低损失特性和等强度结构特点,可同时较好地解决传统凸肩设计中的强度和气动问题.

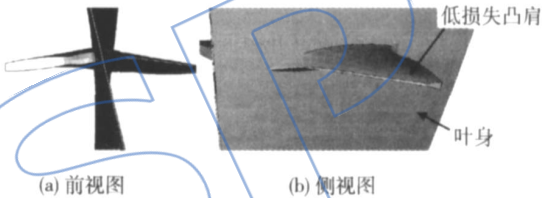


图 4 低损失凸肩局部放大图
Fig. 4 Local enlarged drawing of the shroud with low loss damping

将文中的凸肩结构设计方法,应用于某航空发动机高转速风扇叶片结构改进设计中(见图 1 和图 4),经整机试车试验,获得了良好的试验结果.

1 基本结构形式

等强度低损失阻尼凸肩结构设计图见图 5.凸肩中弧面是由子午面上相应半径处的气流流线

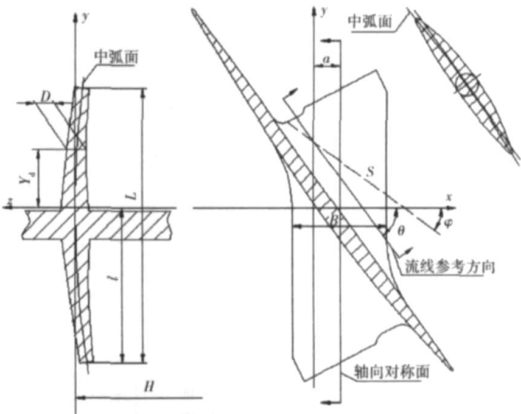


图 5 凸肩结构设计图
Fig. 5 Shroud structure drawing

绕发动机轴线旋转而成的圆台侧表面,对称于中弧面的上、下曲面构成了凸肩的上、下流道面(凸肩型面).以流线参考方向剖出的凸肩截面由图 5 中示出,若将该截面的中弧面(线)展平,则相应的上、下型面即为相同半径 R 的圆弧段(见图 6).

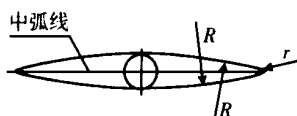


图 6 展平的凸肩型面

Fig. 6 Shroud profile

最大厚度在凸肩轴向的中部,且最大厚度沿周向是变化的,在凸肩工作面处最薄,凸肩与叶身相接处最厚,中间部分厚度按二次曲线形式变化.凸肩的进、排气边缘以转接 r 平滑转接^[2].

2 几何数学模型

等强度低损失阻尼凸肩的结构设计核心在于凸肩上、下流道面的设计.其上、下流道面是由两个特殊空间曲面构造而成,进、排气边缘以同一转接圆弧 r 平滑转接,见图 6.

坐标系定义:原点取在叶片积叠轴与凸肩中弧面的交点上, x 轴与发动机轴线重合,顺气流方向为正; z 轴为叶片积叠轴的径向方向; y 轴按 $Z = X \times Y$ 右手定则确定.

根据阻尼凸肩的基本结构形式(见图 5),建立凸肩上、下表面的曲面方程式

$$Z_1(x, R, D) = H - \left\{ \frac{D}{2} - R + \left[R^2 - \left(\frac{x-a}{\cos \theta} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

$$Z_2(x, R, D) = H + \left\{ \frac{D}{2} - R + \left[R^2 - \left(\frac{x-a}{\cos \theta} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

式中

$$R = \frac{(D/2 - r)^2 + (B/2 \cos \theta)^2}{D - 2r}$$

R ——凸肩型面圆弧半径;

$$D = (y_d - y_{\min})^2 / p + D_{\min}$$

D ——凸肩轴向对称面的厚度;

$$y_d = y - (x - a) \tan \theta$$

$$p = (y_{\max} - y_{\min})^2 / (D_{\max} - D_{\min})$$

$y_{\max}$ ——凸肩轴向对称面上最大厚度点 y 坐标;

$y_{\min}$ ——凸肩轴向对称面上最小厚度点 y 坐标;

$D_{\max}$ ——凸肩轴向对称面上最大厚度;

$D_{\min}$ ——凸肩轴向对称面上最小厚度;

H ——坐标系原点距发动机轴线距离;

B ——凸肩轴向宽度;

α ——凸肩轴向对称面的 x 坐标;

θ ——叶栅流线参考方向与发动机轴线的夹角;

r ——凸肩前、后缘圆弧半径.

3 强度分析方法

强度计算采用常规分析方法^[3],主要是便于设计中各种结构参数的优化调整,文中的设计、分析方法和数值积分计算均已通过 FORTRAN 程序实现^[4],凸肩型面坐标在参数优化后可一次性全部生成.

3.1 质量、质心计算

在设计中,为了使凸肩对叶身的附加弯矩影响达到最小或适当平衡叶身产生的弯矩,必须对凸肩进行质量、质心计算和调整.

凸肩质量、质心坐标可分别通过下列公式计算:

$$m = \int \rho [Z_2 - Z_1] dA$$

$$X_c = \frac{1}{m} \int \rho x [Z_2 - Z_1] dA$$

$$Y_c = \frac{1}{m} \int \rho y [Z_2 - Z_1] dA$$

$$Z_c = \frac{1}{m} \int \rho z [Z_2 - Z_1] dA$$

3.2 应力计算

为便于凸肩设计中的质心调整 and 结构强度优化,设计中采用常规的强度计算方法.如图 5 所示,凸肩任一横截面 S 上的最大应力为

$$\sigma = \frac{M \cdot D_{sm}}{2 \cdot J_s}$$

式中: M 为凸肩离心力对 S 截面产生的弯矩; J_s 为 S 截面的最小主惯性矩; D_{sm} 为 S 截面的最大厚度.

设 S 截面的平面方程为

$$y_s = k \cdot x + b = \tan \phi \cdot x + b$$

当叶片以 ω 转速转动时

$$M = F_{\text{离}} \cdot d = m \cdot Z_c \cdot \omega^2 \cdot d =$$

$$m \cdot Z_c \cdot \omega^2 \cdot \frac{|k \cdot X_c - Y_c + b|}{\sqrt{k^2 + 1}}$$

$$J_s = \int \frac{h^3}{12 \cos \phi} dx = \frac{1}{12 \cos \phi} \int [Z_2 - Z_1]^3 dx$$

式中 m, d 分别为凸肩在 S 截面以外悬臂部分的质量及其质心到 S 截面的距离; h 为 S 截面上的凸肩型面厚度; ϕ 为 S 截面与 x 轴之间的夹角.

4 设计应用实例

在某发动机带凸肩风扇叶片的设计中,由于叶片较大,且具有高转速、高效率、高增压比和高工作强度等特点.对凸肩的设计,即要求满足强度设计标准,又要求尽可能减小气流损失.在前期设计中,曾采用多种传统的等厚凸肩结构方案,其质量和应力均较高,无法满足强度设计标准.改用低损失阻尼凸肩结构后,该风扇叶片的结构设计才得以顺利进行,带等强度低损失阻尼凸肩的叶片实物见图 1.

4.1 与传统凸肩的对比分析

针对同一叶片,若分别采用两种凸肩结构,凸肩质量相同情况下的应力比较见表 1,凸肩应力相同情况下的质量比较见表 2.

表 1 凸肩质量相同情况的应力对比

Table 1 Stress comparison for the same shroud weight			
	低损失凸肩	传统凸肩	应力变化/ %
单侧凸肩质量/ g	29.75	29.74	
凸肩最大应力/ MPa	554.8	766.2	- 27.6

表 2 凸肩最大应力相同情况的质量对比

Table 2 Weight comparison for the same max stress of shroud			
	低损失凸肩	传统凸肩	质量变化/ %
凸肩最大应力/ MPa	554.8	554.5	
单侧凸肩质量/ g	29.75	41.57	- 28.4

由表 1 可见,以应力指标衡量,如果质量均在 30 g 附近,低损失凸肩的应力要比传统凸肩应力降低 27.6 %.

由表 2 可见,以质量指标衡量,如果应力水平均在 555 MPa 附近,低损失凸肩的质量要比传统凸肩质量减轻 28.4 %.

4.2 有限元静力分析结果

采用 MSC. MARC 有限元分析软件^[5]对该凸肩进行了静力计算分析.

凸肩应力分布云图见图 7;叶片变形见图 8.

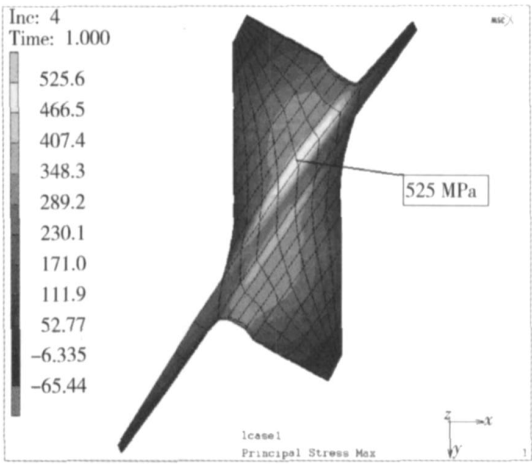


图 7 凸肩下表面应力分布

Fig. 7 Stress contour on the lower surface of shroud

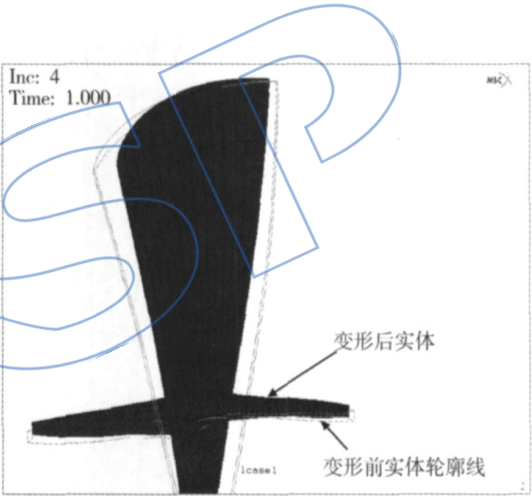


图 8 叶片变形图

Fig. 8 Deformed shape with undeformed edge of blade

计算结果表明:

- (1) 凸肩上应力分布均匀合理,高应力区分布较宽,最大应力为 525 MPa,其位置虽然靠近凸肩根部,但应力集中现象不严重,见图 7.
- (2) 对比表 1 和图 7,有限元分析的最大应力为 525 MPa 比常规设计的最大应力 554.8 MPa 降低约 5 %,是合理的.因为在常规设计中未考虑叶身结构的影响.
- (3) 两侧凸肩的径向位移之差小于凸肩厚度,能保证凸肩工作时的稳定配合,不会出现搭接现象.

4.3 台架试验结果

在某高转速风扇转子的改进设计中,其风扇叶片经过叶型和凸肩结构的重新设计,风扇转子试验

件通过了一系列台架试车测试. 试验结果表明:

(1) 在风扇转速增加 7.4 % 的情况下, 该试验件级效率提高了 3.5 %.

(2) 在整个试车过程中, 整级叶片无明显振动现象.

(3) 该凸肩结构承受了高转速的考核.

5 结 论

通过上述理论和试验分析, 可以得出如下结论:

(1) 同时对叶片进行叶型改进设计和凸肩重新设计后, 叶片的级压比和效率均有明显提高. 气动性能的提高, 除叶型改进是主要因素外, 低损失流线型的凸肩结构对气动性能的提高也起到了重要作用.

(2) 应用等强度低损失阻尼凸肩的结构设计方法, 不但可方便完成流线型凸肩的造型设计, 以减小气流损失, 还可解决凸肩在高转速工作时的

强度与质量相互矛盾的问题.

(3) 采用等强度结构设计方法, 可使凸肩上的应力分布更合理, 从而保证凸肩在高转速下的安全可靠工作.

(4) 在应力相同情况下, 采用等强度低损失阻尼凸肩, 其凸肩质量明显低于传统凸肩.

参考文献:

- [1] 沈达宽. 航空发动机强度计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 黄致建. 某种低损失阻尼凸肩的结构设计[J]. 航空发动机, 1995, (4): 25-31.
- [3] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [4] 华中工学院数学教研室, 软件教研室. 算法语言、计算方法[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- [5] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.