

圆弧榫风扇盘结构的优化设计

杨伟, 郝艳华, 黄致建

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为改善航空发动机风扇盘应力状态,减轻风扇盘质量,首先将风扇盘简化为二维轴对称模型,使用随机搜索法,在 ANSYS 软件下对其进行结构优化.然后,分别针对原始盘和优化盘的三维实体结构构建风扇叶片/盘模型,在其工作状态下,模拟接触分析.对比优化前后的结构分析结果,发现优化后叶片/盘组合模型和单独的盘体应力分布梯度明显减小,各应力值均有不同程度的下降,盘的质量减轻,使盘的工作安全性和寿命都有所提升.

**关键词:** 风扇盘; 接触分析; 圆弧榫; 优化设计; 发动机

**中图分类号:** V 232.3      **文献标志码:** A

涡轮风扇发动机因其效率高、油耗低、航程远,而成为现代航空领域的首选发动机.涡扇发动机的外涵推力完全来自于风扇所产生的推力,所以风扇的好坏直接影响到发动机的性能.随着科技发展,航空发动机的逐渐轻量化已成为一种趋势.风扇作为发动机的重要组成部分,它的轻量研究也变得十分必要.风扇叶片的数目是固定的,为了在盘上安装所有的叶片,将叶片根部做成与叶身根部截面形状基本一致的圆弧形,使叶身与燕尾形榫头间的平台周长上宽度变窄,轮缘直径就可以取得较小,这就是目前航空发动机风扇盘开弧形榫槽的原因.本文运用有限元分析软件建立发动机风扇叶片、榫头、榫槽和轮盘模型,对某型航空发动机风扇盘进行优化设计.

1 结构优化设计

航空发动机风扇盘可近似简化为轴对称结构,对盘的结构优化事实上就是在满足设定条件下对盘的子午面关键尺寸寻优.即将风扇盘子午面主要结构尺寸作为可变参数,运用 APDL 建立发动机风扇盘参数化模型,分别定义优化设计变量(DV)、状态变量(SV)和目标函数(OBJ).

图 1 为双辐板风扇盘子午面轮廓,将其绕轴旋转一周既得完整的风扇盘模型.对风扇盘结构的优化,就转化成了对盘子午面主要结构尺寸的优化.文中共设定 13 个设计变量,分别如图 1 所示.图 1 中:  $L1 \sim L8$  和  $L11$  为编号对应的直线长度;  $\varphi_1$  为直线 4 与旋转轴夹角;  $r1, r2$  为编号对应的圆弧半径;  $h1$  为编号 12 所示的径向高度差.

以第四强度理论为准则<sup>[1]</sup>,即以盘体最大等效应力为状态变量.提取盘体最大应力  $\sigma_{max}$ ,在  $\sigma_{max} < [\sigma]$  条件下寻求盘体质量最轻即为目标函数.由于风扇盘为均质结构,将质量最轻转化为体积最小,即设置  $V_{min}$  为目标函数.盘体材料为 TC4 合金,室温下材料属性:弹性模量  $E$  为 109 GPa;密度  $\rho$  为  $4.44 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;材料抗拉强度  $\sigma_b$  为 890 MPa;材料屈服

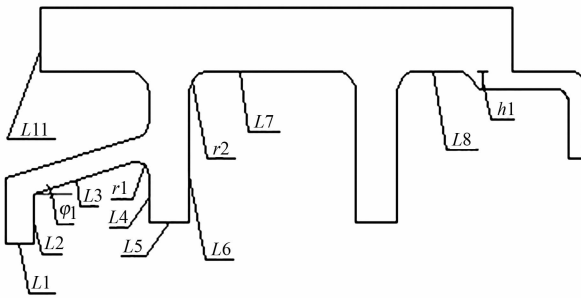


图 1 双辐板风扇盘子午面轮廓  
Fig. 1 Double-web fan disc meridian plane profile

强度  $\sigma_{0.2}$  为 825 MPa, 材料的线膨胀系数  $\alpha$  为  $9.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; 泊松比  $\mu$  为 0.3.

建立如图 1 所示风扇盘二维参数化模型, 单元类型为 PLANE 82, 通过单元关键字 KEYOPT, 1, 3, 1 设置模型为轴对称属性(围绕 Y 轴), 以  $5\,650 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速的形式施加离心载荷, 同时在盘体轮缘施加 100 MPa 的均布载荷, 对盘体进行弹性应力分析, 以确保风扇盘有足够的应力储备<sup>[2]</sup>.

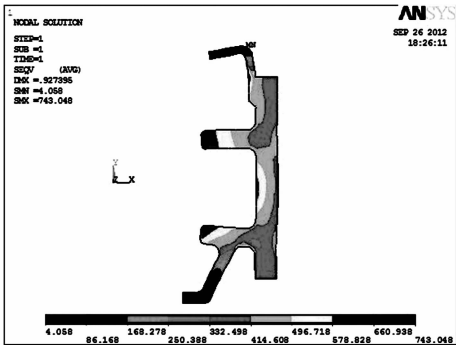
ANSYS 提供了零阶法<sup>[3]</sup>和一阶法两种优化方法. 文中选取零阶优化法, 通过 32 步迭代计算, 得到一组最优设计变量和相对应的状态变量和目标函数值, 结果如表 1 所示. 表 1 中:  $\gamma$  为优化率.

表 1 优化设计结果与设计状态对比

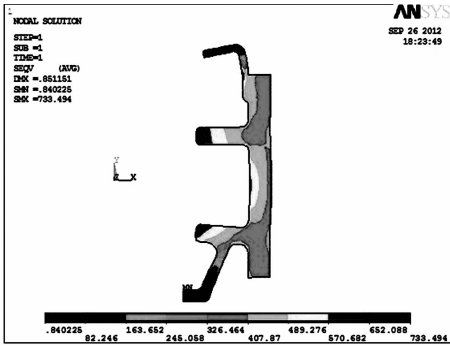
Tab. 1 Comparison between optimization results and design state

参数	设计值	优化值	$\gamma/\%$	参数	设计值	优化值	$\gamma/\%$
L1/mm	8.000 0	7.399 2	-7.51	r2	5.000 0	4.510 0	-9.80
L2/mm	12.000 0	10.879 0	-9.34	L7/mm	45.000 0	45.613 0	+1.36
$\varphi 1/^{\circ}$	22.000 0	21.432 0	-2.58	L8/mm	10.000 0	10.519 0	+5.19
L3/mm	25.000 0	23.006 0	-7.98	h1	4.000 0	4.162 0	+4.05
r1	6.000 0	6.975 6	+16.30	L11/mm	15.000 0	14.288 0	-4.75
L4/mm	7.000 0	7.701 4	+10.20	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	789.29	744.84	-5.63
L5/mm	10.000 0	11.251 0	+12.5	$V_{\min} \times 10^6/\text{mm}^3$	1.829 0	1.680 5	-8.12
L6/mm	30.000 0	29.567 0	-1.44				

从表 1 可知: 优化后的风扇盘最大等效应力下降 5.63%, 体积减小 8.12%, 因为盘是均值结构, 所以盘的质量减轻了 8.12%. 优化前后盘体二维简化模型应力分布特征相近, 如图 2 所示.



(a) 优化前



(b) 优化后

图 2 优化前后简化盘体等效应力

Fig. 2 Equivalent stress of the simplified disc before and after optimization

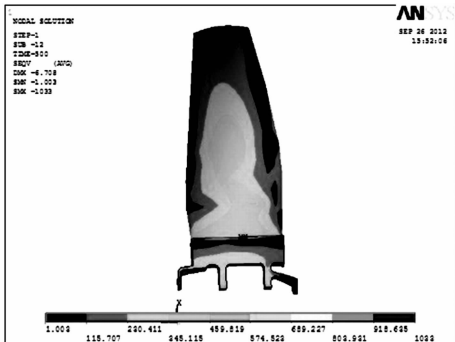
2 优化结果验证

对风扇叶片/盘结构工作状态作三维模拟接触分析, 以检验第一步优化结果的合理性. ANSYS 为用户提供了两种操作模式: GUI(Graphical User Interface)和命令流<sup>[4]</sup>. 发动机风扇叶片模型比较复杂, 所以文中采用 APDL 命令流建模, 具体有如下 4 个步骤.

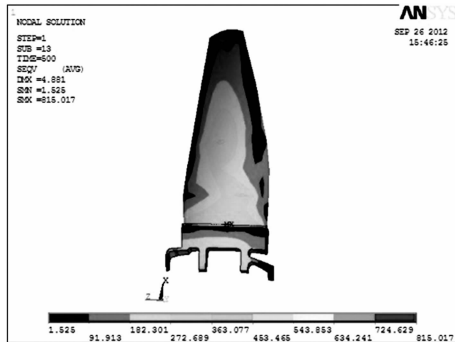
- 1) 定义参数. 按照 APDL 参数命名规则, 定义叶片/盘坐标、尺寸参数和材料参数. 建立基准坐标系, 定义坐标参数; 发动机叶片/盘材料为 TC4 合金, 定义材料密度、弹性模量、泊松比等主要参数; 模型尺寸包括榫头、榫槽几何尺寸参数, 计算榫头关联尺寸和榫槽关联尺寸.
- 2) 建模和分网. 建立叶型截面型值点, 通过曲线生成命令(BSPLIN)生成叶身截面样条曲线, 再通过蒙皮命令(ASKIN)生成叶身. 定义榫头的几个几何关键点, 生成榫头轮廓线, 按榫头圆弧半径扫略生成榫头实体. 根据榫头榫槽几何关系, 建立榫槽实体及盘的简化结构. 本叶片/盘模型选用 SOLID186 单元进行分网, 该单元是 3 维 20 节点六面体单元, 且可以退化为 10 节点四面体单元, 13 节点金字塔单元和 15 节点三棱柱单元, 适用于复杂曲面实体<sup>[5]</sup>.
- 3) 接触设置. 根据模型特征, 确定接触区域. 设定接触区域中的榫槽弧面为目标面, 用 TARGET 170 表示目标单元, 接触区域中对应的榫头弧面为接触面, 用 CONTACT 174 表示接触单元.

4) 约束、加载和求解. 模拟风扇工作环境, 对叶片/盘结构施加约束和载荷. 实际发动机风扇是周期对称结构, 在文中, 任意选取其中一个叶片及其对应的轮盘扇形区域作为研究对象. 为符合风扇实际工况中的固定和旋转结构特征, 在风扇盘和榫头的一个端面施加轴向约束, 将榫槽和盘的侧面上节点旋转到柱坐标系下, 施加周向约束. 考虑气动力和离心力两种载荷作用, 离心力通过角速度形式加载. 计算发动机工作状态风扇气动压力值, 通过 APDL 命令施加到叶盆侧和叶背侧节点法向. 为使该非线性分析具有较好的收敛特性, 设定载荷步参数<sup>[6]</sup>, 然后进行求解.

5) 对比分析. 遵循接触分析步骤, 分别对风扇盘结构优化前后的叶片/盘工作状态作模拟接触分析. 查看优化模型应力变形是否符合实际工况结果, 以及其主要参考特征是应力集中效应和三坐标方向应力梯度分布. 工作状态下, 风扇模拟接触分析应力分布云如图 3~4 所示.



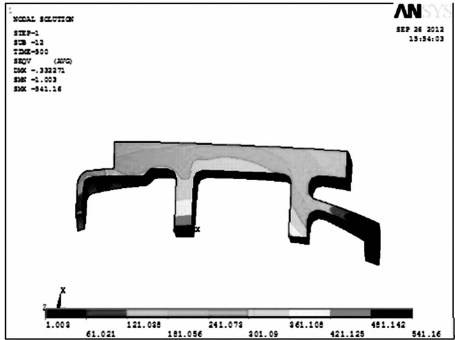
(a) 优化前



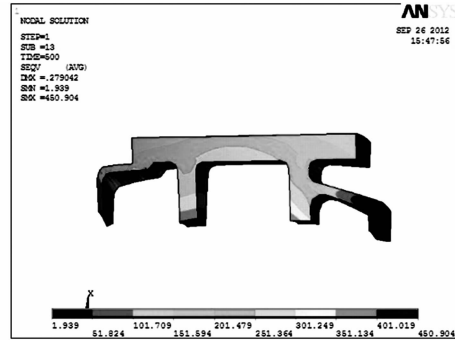
(b) 优化后

图 3 优化前后总体等效应力云图

Fig. 3 General equivalent stress nephogram before and after optimization



(a) 优化前



(b) 优化后

图 4 优化前后盘体等效应力云图

Fig. 4 Disc equivalent stress nephogram before and after optimization

模拟风扇工作状态, 盘体关键点在  $X, Y, Z$  的 3 个方向上应力变化趋势对比, 如图 5 所示. 图 5 中: 后缀 1 代表优化前; 后缀 2 代表优化后. 从图 5 可知: 优化前后各点在  $X, Y, Z$  方向受力结果变化趋势相近, 其中,  $X$  向应力(主应力)明显下降,  $Y$  向应力均略有下降,  $Z$  向应力变化不大. 基于盘体的循环对称性, 以上所选点在周向和轴向均有代表性, 即说明盘体优化后受力情形符合风扇工作状态受力情况; 同时, 不同程度的应力下降, 将使风扇盘工作更加平稳安全, 盘体寿命也将延长.

风扇叶片/盘结构优化前后的总体最大等效应力( $\sigma_{\text{tot}, \text{max}}$ ), 以及单独盘体优化前后的最大等效应力( $\sigma_{\text{max}}$ )、最大径向应力( $\sigma_{r, \text{max}}$ )、最大周向应力( $\sigma_{\theta, \text{max}}$ )和最大轴向应力( $\sigma_{z, \text{max}}$ ), 如表 2 所示.

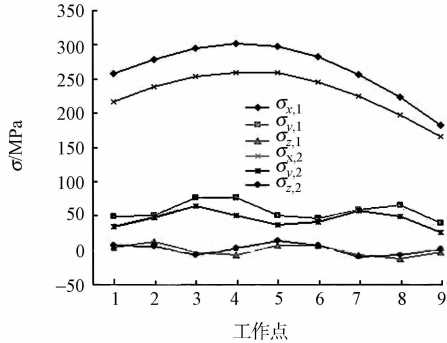


图 5 风扇盘代表点优化前后应力变化对比  
Fig. 5 Comparison of the representative point stress variation of fan disc before and after optimization

表 2 优化前后主要应力表

Tab. 2 Major stress table before and after optimization

MPa

项目	$\sigma_{\text{tot,max}}$	$\sigma_{\text{max}}$	$\sigma_{r,\text{max}}$	$\sigma_{\theta,\text{max}}$	$\sigma_{z,\text{max}}$
优化前	1 033.0	541.5	308.8	541.2	456.1
优化后	815.0	450.9	283.3	432.6	444.7
$\gamma/\%$	-21.1	-16.7	-8.3	-20.1	-2.5

3 结 论

基于 ANSYS 软件,对某型航空发动机风扇盘结构进行了结构优化设计,风扇盘辐板尺寸、前后轴颈尺寸及部分定位尺寸均发生了变化,分别模拟盘体优化前后风扇叶片/盘三维实体工作状态下的接触分析,通过对比叶片/盘和单独盘体模型应力集中效应及盘体三向受力变化趋势,验证了模型。

在优化后风扇盘质量减轻的同时,风扇叶片/盘整体模型应力分布更加均匀合理,最大等效应力下降 21.1%,到达合理范围内;盘体最大等效应力下降 16.7%,质量减轻 8.12%,优化结果将使风扇盘工作更加平稳安全,且寿命亦得到延长. 这将为航空发动机的减负研究提供一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004:243.

[2] 刘玉琳,戚俊清. 基于 ANSYS 的轴对称旋转构件优化设计方法[J]. 煤矿机械,2008,29(4):22-24.

[3] 李伦未,陆山. 基于 ANSYS 的多辐板风扇盘结构优化设计技术[J]. 航空动力学报,2011,26(10):2245-2250.

[4] 博弈创作室. 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:180-193.

[5] 刘伟,高维成,于广滨. ANSYS12.0 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2010:59-63.

[6] 林香,黄致建,郝艳华. 弧形燕尾型榫连接组件三维接触分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(3):427-429

Structure Optimum Design of Arc Tenon Fan Disc

YANG Wei, HAO Yan-hua, HUANG Zhi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the stress state of the aero engine fan disc, and reduce its weight, in this paper, the fan disc was simplified to two-dimensional axisymmetric model and the random search methods were used under ANSYS software to optimize the fan disc structure size. Then, the three dimensional fan disc models of the original disc and optimum disc were built under the working condition, and the contact analyses were simulated Simultaneously. The weight of the fan disc has been reduced as the main structure size changed. By comprising the structural analysis results of the design state and optimizing state, we find that the stress distribution gradient of the blade/disc combination model and single disc model is reduced significantly, and the stress value is decreased in some degree. The weight of disc is reduced are improved.

**Keywords:** fan disc; contact analysis; arc tenon; structure optimum design; engine

(责任编辑: 陈志贤

英文审校: 杨建红)