

利用三维接触有限元法的透平叶片 枞树型叶根轮缘优化

吴君, 张获, 马丹丹, 张明辉, 谢永慧

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用三维接触有限元方法对透平叶片枞树型叶根轮缘结构进行了优化研究. 以单个叶片为研究对象, 采用零阶一阶算法、智能优化算法及模式搜索算法对叶根轮缘的 7 个特征尺寸进行了优化分析; 结合实际工作状态, 建立了 3 个叶片及轮缘的多变量优化模型, 采用模式搜索算法对叶根轮缘结构进行了优化. 结果表明: 以单个叶片为例, 在综合考虑优化精度和优化时间的情况下, 模式搜索算法是解决叶根轮缘优化问题的最优方法; 利用符合实际的模型可以得到能使叶根轮缘最大等效应力大幅度减小的优化结构, 优化前后叶根和轮缘的最大等效应力位置基本不变, 最大等效应力分别减小 11.96% 和 21.63%.

关键词: 结构优化; 枞树型叶根轮缘; 多变量模型; 有限元法

中图分类号: TK24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0025-07

Optimization for Turbine Blade with Fir-Tree Root and Rim by Three-Dimensional Contact Finite Element Method

WU Jun, ZHANG Di, MA Dandan, ZHANG Minghui, XIE Yonghui

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fir-tree root and rim of a turbine blade was optimized by the three-dimensional contact finite element method. A single blade model was adopted to optimize seven characteristic geometrical variables of the fir-tree root and rim by zero-order algorithm and first-order algorithm, intelligence optimization algorithm and pattern search algorithm. A multi-variable model with three blades and their rim which was considered to represent a more true working condition of turbine blades was established, and the structure of the blade root and rim was optimized by pattern search algorithm. The results show that pattern search algorithm is the best algorithm to solve this optimization problem in consideration of the accuracy and computation time according to the results of a single blade model optimization. The optimum structure which leads to significant decrease in the maximum equivalent stress of the blade root and rim can be obtained by using the model with three blades and their rim. Compared with the original design, the position of the maximum equivalent stress of the blade root and rim changes slightly and the maximum equivalent stress of the blade root and rim decreases by 11.96% and 21.63%, respectively.

Keywords: structural optimization; fir-tree root and rim; multi-variable model; finite element method

叶片是透平机械中的重要零部件,承担着将工质热能转换为机械能的重要任务^[1],其安全性对于整个机组的可靠运行至关重要.据相关资料统计,汽轮机叶片损坏的事故约占汽轮机事故的30%^[2],因此有必要通过设计新的叶片结构和改进已有设计来提高机组安全性.由于枫树型叶根装拆方便、承载能力高,所以被广泛应用于燃气轮机和大功率汽轮机叶片上,但该叶根与相应的轮缘接触会出现复杂的应力状况,产生应力集中,因此通过优化几何结构来降低应力水平具有重要意义.

国内外学者在枫树型叶根轮缘的优化方面进行了研究,西安交通大学涡轮机教研室^[3]采用平面应力有限元分析程序对枫树形叶根轮缘应力进行了分析,得出了一些合理结构设计的初步结论.邢誉峰等^[4]使用发动机涡轮盘榫槽形状优化系统SOSATT对二维枫树型轮缘进行了优化设计,验证了两点积累信息的原/倒变量展开的对偶优化方法DEORCT在研究本问题上的可行性.Meguid^[5]等对枫树型叶根进行了二维和三维有限元分析,指出三维计算能够比较准确地得到叶根轮缘的应力分布,同时讨论了设计尺寸对叶根轮缘强度的影响.Song等^[6]以经济性为目标对二维涡轮枫树型叶根进行了多变量优化设计.赵海^[7]基于软件UG建立了参数化模型,并在考虑温度影响的前提下,采用软件ANSYS对涡轮榫头/榫槽进行了验证性设计.姚利兵等^[8]在UG平台上建立了一个榫头参数化设计模型,以榫头质量为目标函数对榫头进行优化设计.杨敏超等^[9]利用软件ANSYS和优化软件iSIGHT中修正的拉格朗日方法,对某航空发动机涡轮榫头/榫槽进行了结构优化设计,从而大大减小了最大拉伸应力和当量应力.

综合国内外相关研究发现,对于透平叶片枫树型叶根轮缘结构的优化分析多采用二维有限元模型,未考虑应力沿轴向的变化,所以影响了分析结果的准确性.对于采用三维模型对枫树型叶根轮缘进行分析,主要是针对几何参数对结构强度的影响,虽然得到了一些设计准则,但没有采用优化算法对结构进行优化分析,所以不能获得可使最大应力最小化的最优结构参数.为此,本文建立了具有枫树型叶根的叶片和轮缘多变量优化三维有限元模型,通过寻找叶根轮缘特征尺寸的最优解,来达到最大等效应力最小化的目的.

1 三维接触有限元方法及优化算法

1.1 三维接触有限元方法

有限元法是解决复杂工程问题最有效的数值方法之一,也成为求解接触问题的一种主要方法^[10].本文所用三维接触有限元方法是采用ANSYS实现的,叶根与轮缘间的接触以及相邻叶片围带间的接触均属于面-面接触,因此采用面-面接触单元建立接触关系,接触算法选用增广拉格朗日法,并用稀疏矩阵法展开了叶片轮缘模型的三维接触有限元非线性分析.

接触问题在有限元法框架下描述如下^[11].

系统总势能

$$\Pi(\delta) = \frac{1}{2} \delta^T K \delta - \delta^T F \quad (1)$$

使其最小化需满足如下约束条件

$$\Delta_{i+1} = NC \delta_{i+1} + \Delta_i = 0 \quad (2)$$

式中: K 为结构有限元总刚度矩阵; F 为外载荷矢量; δ 为有限元网格节点位移矢量; Δ_i 为第*i*次迭代接触面节点的材料重叠矢量; N 为单元形函数矩阵; C 为接触变形一致性条件矩阵.

在增广拉格朗日算法^[10]中,通过构造修正的势能泛函 Π^* 可使有约束问题转化为无约束问题. Π^* 的表达式为

$$\Pi^* = \Pi(\delta) + \lambda^T (NC \delta + \Delta) + \frac{1}{2} \Delta^T \alpha \Delta \quad (3)$$

式中: λ 为拉氏乘子; α 为罚参数.对 Π^* 取驻值,通过推导,可以得到接触问题的控制方程

$$K^* \delta^* = F^* \quad (4)$$

式中

$$K^* = \begin{bmatrix} K + K_P & (NC)^T \\ NC & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_P = (NC)^T \alpha (NC) \quad (6)$$

$$F^* = \begin{bmatrix} F - (NC)^T \alpha \Delta \\ -\Delta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\delta^* = \begin{bmatrix} \delta \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

考虑到拉氏乘子的物理意义,用接触力代替 λ ,并使其在迭代计算中作为已知量出现,这样既吸收了拉格朗日算法和罚函数法的优点,又未增加系统求解规模,且收敛速度较快.

1.2 优化算法

结构优化是优化算法控制下的最优解搜索过

程. 最优化问题的数学模型是找到 $\mathbf{x}=[x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n]^T$, 且满足

$$\left. \begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) \\ g_i(\mathbf{x}) \leqslant 0, \quad i=1,2,\cdots,m \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j=1,2,\cdots,p \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为设计变量; $f(\mathbf{x})$ 为目标函数; $g_i(\mathbf{x})$ 、 $h_j(\mathbf{x})$ 为约束变量; m 、 p 为约束变量的数量. 通过建立合适的数学模型可以确定模型的设计变量、约束条件以及目标函数, 在综合考虑优化效果和求解时间的情况下, 选择合适的优化算法便可进行分析.

本文首先采用零阶一阶算法^[12]进行叶根轮缘的优化, 即以零阶算法优化结果作为初值, 采用一阶算法进行优化控制. 为了提高叶根轮缘的优化效率和可靠性, 本文进一步采用遗传算法^[13]、粒子群算法^[14]、模拟退火算法^[15]和模式搜索法^[16]对叶根轮缘进行优化分析.

1.3 优化过程

图 1 为结构优化分析流程. 结构优化分析主要包括有限元数值分析和优化控制. 首先采用程序 APDL 建立叶片和轮缘的参数化有限元模型并确定设计变量, 然后对设计变量赋初值. 在满足了模型几何约束条件的情况下, 采用 ANSYS 进行有限元分析并获得目标函数的值, 即叶片的叶根与轮缘的最大等效应力. 如果设计变量值不满足几何约束条件, 则由优化算法通过重新计算获得下一组设计变量; 如果目标函数值不满足收敛条件, 则继续通过优化算法更新设计变量, 并重新构造结构有限元模型进行分析, 直至满足收敛条件, 最终获得目标函数的最优值.

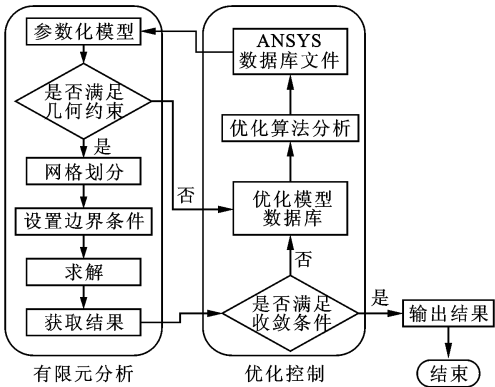


图 1 结构优化分析流程

2 多种优化方法对比

在寻找优化算法的过程中, 为了减小计算量, 本

文以单个叶片轮缘模型为研究对象, 分别采用零阶一阶算法、智能优化算法(遗传算法、粒子群算法和模拟退火算法)及模式搜索算法进行优化, 其中零阶一阶算法是采用 ANSYS 优化分析模块自带的算法, 其余 4 种优化算法的分析是通过编写 APDL 调用 ANSYS 实现的.

为了验证所编优化算法的准确性, 本文对一个多峰函数(二元函数)进行了极值求解, 该函数是一个验证优化方法的好算例. 多峰函数的表达式为 $f=4-\left[x_1^2+2x_2^2-0.3\cos(3\pi x_1)\cos(4\pi x_2)\right]$

(10)

式中: x_1 、 x_2 的变化范围为 $[-1.024, 1.024]$. 以 x_1 和 x_2 为设计变量, 以 $-f$ 为目标函数进行优化分析, 可以获得目标函数极小值(即 f 的极大值)的设计变量.

多峰函数极大值的精确解是 $x_1=0$ 、 $x_2=0$ 、 $f=4.3$, 设计变量初值为 $x_1=0.9$ 、 $x_2=-1.0$. 表 1 为不同优化算法的分析结果. 从表 1 可以看出, 4 种优化算法获得的设计变量及目标函数值与理论精确解非常吻合(二者比值 r 近似为 1), 从而验证了本文优化算法的有效性.

表 1 不同优化算法的分析结果

优化算法	$x_1/10^{-5}$	$x_2/10^{-6}$	f	$r/\%$
遗传	4.946 00	1.099 0	4.300	100.000
粒子群	1.510 00	-6.060 0	4.300	100.000
模拟退火	244.700 00	802.300 0	4.299	99.998
模式搜索	0.038 15	0.228 9	4.300	100.000

2.1 计算模型及边界条件

图 2 为具有枫树型叶根的叶片轮缘三维模型, 其中叶根和轮缘的两对齿在离心力的作用下相互接触. 采用 APDL 建立了叶片轮缘的参数化三维模型并进行了网格划分. 图 3 为叶片轮缘的网格划分, 其中轮缘、围带、叶身及叶根采用三维 8 节点六面体单元, 叶根平台的局部区域采用四面体单元来过渡, 通过多个有限元网格模型对比后, 最终选定用于分析的模型节点数为 119 301, 单元数为 129 943.

表 2 为叶片轮缘的材料特性. 在叶根和轮缘的两对接齿面间建立面-面接触关系, 见图 3. 对轮缘周向的 2 个侧面上的节点施加切向约束, 对轮缘径向底面上的节点施加切向和径向约束, 对轮缘径向底面上的中心节点施加径向、轴向和切向约束, 叶片转速为 3 000 r/min.

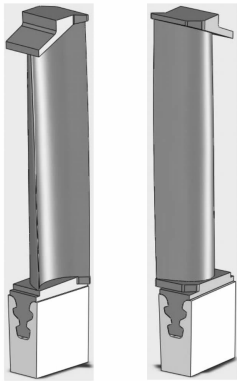


图 2 叶片轮缘三维模型

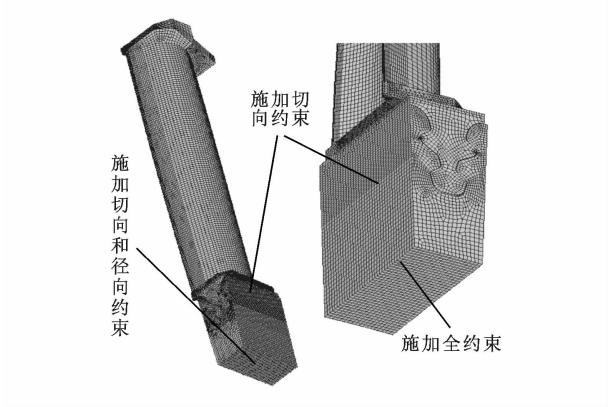


图 3 叶片轮缘网格及边界条件设置

表 2 叶片轮缘的材料特性

参数	叶片	轮缘
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7 810	7 760
弹性模量/GPa	212	204
泊松比	0.3	0.3

2.2 优化过程

参数化建模时要充分考虑叶片、叶根和轮缘结构的关键尺寸。本文选择如下设计变量:叶根展开角度 A ,接触面倾斜角 B ,第一对齿颈宽度 L ,接触面处叶根内圆角半径 R_1 ,接触面处轮槽外圆角半径 R_2 ,接触面宽度 C_1 ,接触面处叶根外圆角及轮槽内圆角半径 R_c ,如图 4 所示。为了获得合理的几何结构,需要对图 4 中的 L_{12} 、 L_{45} 、 L_{89} 、 L_s 和 R_2/R_1 施加几何约束,其取值满足表 3 条件。优化的目标函数为叶根最大等效应力和轮缘最大等效应力中的较大者 $\sigma_{\max}$,为单目标的优化。

2.3 优化结果分析

表 4 为优化前、后的设计变量,表 5 为优化后目

标函数相对于优化前的变化率。

表 3 设计变量区间及几何约束条件

	变量	初始值	优化区间
设计变量	$A/(^{\circ})$	13.00	[5,21]
	$B/(^{\circ})$	25.00	[10,40]
	L/mm	12.90	[7.0, 17.0]
	R_1/mm	1.20	[0.4, 2.0]
	R_2/mm	1.70	[0.65, 2.75]
	C_1/mm	3.15	[1.5, 5.5]
	R_c/mm	1.00	[0.5, 1.5]
几何约束	L_{12}/mm	5.70	≥ 0.4
	L_{45}/mm	2.85	≥ 1.0
	L_{89}/mm	2.82	≥ 0.2
	L_s/mm	1.12	≤ 1.3
	$R_2 \cdot R_1^{-1}$	1.42	> 1
目标函数	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	430.08	

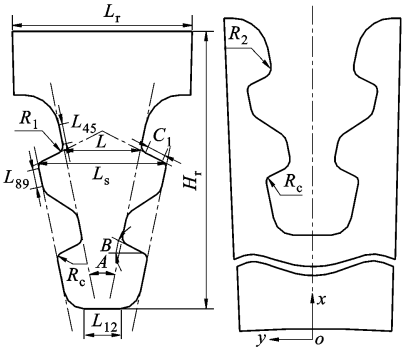


图 4 叶根轮缘设计变量

表 4 各种优化算法优化前后的设计变量值

设计变量	初值	不同优化算法的设计变量值				
		零阶一阶	遗传算法	粒子群	模拟退火	模式搜索
$A/(^{\circ})$	13.00	15.63	18.24	15.00	13.59	16.00
$B/(^{\circ})$	25.00	19.38	27.92	36.99	24.02	39.12
L/mm	12.90	12.80	13.50	13.84	10.57	12.86
R_1/mm	1.20	1.03	1.41	1.00	1.80	1.20
R_2/mm	1.70	1.65	1.90	1.05	2.16	1.59
C_1/mm	3.15	2.78	2.37	2.42	3.47	3.27
R_c/mm	1.00	1.19	1.50	1.49	1.50	1.49

通过对比发现,本文采用的优化算法均能使目标函数值有所降低,经遗传算法和模式搜索算法优化后,目标函数值降低的幅度(分别降低 18.98%和 19.98%)明显大于其余 3 种优化算法(分别降低 8.87%、14.34%和 12.49%),表明遗传算法和模式搜索算法的优化效果比较好.从计算时间上看,遗传算法进行了 840 次三维接触有限元计算,模式搜索算法进行了 285 次计算,可见模式搜索算法在相对较短的时间内可以获得效果较好的优化解.

表 5 优化后目标函数的相对变化率

优化算法	$\sigma_{\max}$ 的相对变化率/%
零阶一阶	-8.87
遗传	-18.98
粒子群	-14.34
模拟退火	-12.49
模式搜索	-19.98

图 5、6 是优化前后叶根和轮缘的应力状况对比.图 5 显示:优化前叶根的最大等效应力位于吸力面侧第一对齿的圆角处,为 376.10 MPa;轮缘的最大等效应力位于压力面侧第二对齿圆角处,为 430.08 MPa.图 6 显示:经模式搜索算法优化后叶根的最大等效应力位于吸力面侧叶根第一对齿圆角处,为 344.17 MPa;轮缘的最大等效应力位于压力面侧第二对齿圆角处,为 341.18 MPa.叶根、轮缘的最大等效应力分别下降了 8.49%、20.67%,可见优化效果明显.

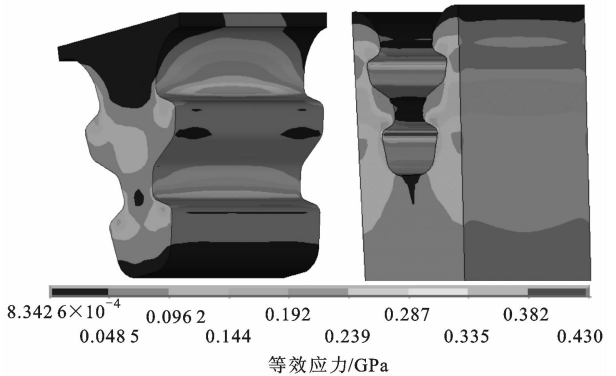


图 5 优化前叶根和轮缘的等效应力

3 多叶片模型的叶根轮缘优化

实际运行中,具有围带的中长透平叶片在离心

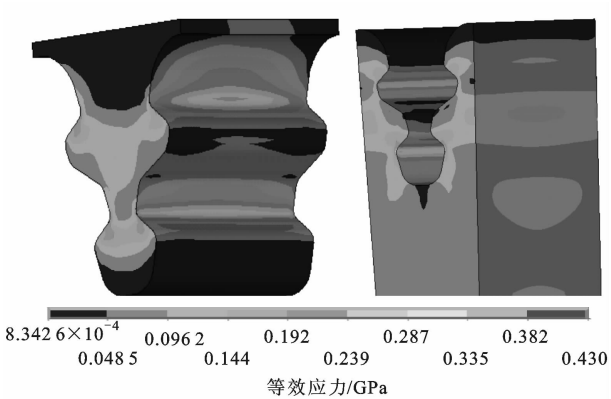


图 6 经模式搜索算法优化后叶根和轮缘的等效应力

力的作用下会发生扭转变形,相邻叶片的围带接触将影响叶片的应力分布.本文构造了 3 个叶片和对应的轮缘模型,并采用模式搜索算法进行了结构优化,从而得到更能真实反映叶片轮缘实际工况的优化结果.

3.1 计算模型及边界条件

图 7 为 3 个叶片及对应轮缘的三维模型及网格划分,模型节点数为 336 727,单元数为 337 335.

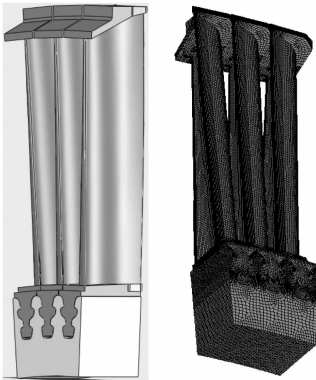


图 7 3 个叶片及对应轮缘的三维模型及网格划分

3 个叶片的叶根齿接触面分别与对应的轮缘齿接触面建立接触关系,中间叶片围带的 2 个侧面分别与相邻叶片围带对应的侧面建立接触关系.为了模拟整圈连接时的状况,将左侧叶片围带上不与中间叶片接触的节点和与右侧叶片围带对应侧面上的节点的边界条件设置为周期对称的,轮缘侧面和底面的位移约束与单叶片时一致,叶片转速为 3 000 r/min.

优化模型的设计变量和几何约束与单个叶片模型相同,见图 4、表 3.由于中间叶片应力受边界条件的影响较小,所以取中间叶片的叶根及对应轮缘的最大等效应力的较大者作为目标函数.

3.2 结果分析

表 6 为 3 个叶片的多变量优化模型在采用模式搜索算法优化后的设计变量. 优化过程中进行了 414 次三维接触有限元计算.

经模式搜索算法优化后, 3 个叶片轮缘模型的等效应力如图 8 所示. 从图 8 可以看出: 模型等效应力最大值发生在两侧轮缘上, 为 340.19 MPa; 3 个叶片及对应轮缘的等效应力分布基本一致.

表 6 优化前后的设计变量

设计变量	原始值	优化解
$A/^{\circ}$	13.00	18.61
$B/^{\circ}$	25.00	33.14
L/mm	12.90	12.41
R_1/mm	1.20	1.99
R_2/mm	1.70	2.47
C_1/mm	3.15	2.38
R_c/mm	1.00	1.25

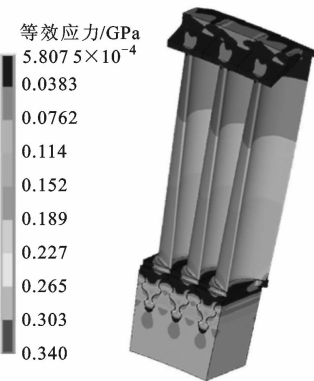


图 8 优化后 3 个叶片轮缘模型的等效应力

图 9、10 分别为原始模型和优化模型中间叶片的叶根轮缘的等效应力. 从图 9、10 可以看出, 优化前后, 应力分布基本一致, 但其值存在较大差异. 优化后, 叶根最大等效应力位于吸力面第一对齿圆角处, 为 338.17 MPa, 比优化前的 384.10 MPa 减小了 11.96%; 轮缘最大等效应力仍位于压力面第二对齿圆角处, 为 337.18 MPa, 比优化前的 430.23 MPa 减小了 21.63%. 此外, 叶根和轮缘的最大等效应力非常接近, 基本上满足枫树型叶根轮缘等强度设计的要求. 优化后的叶根轮缘最大等效应力远小于材料的屈服极限 $\sigma_{0.2}=600\text{ MPa}$, 完全满足安全性要求.

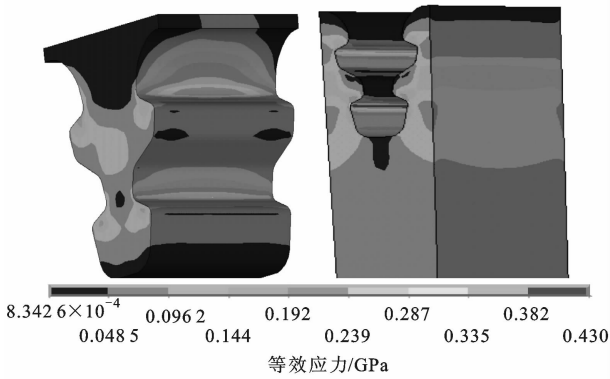


图 9 原始模型中间叶片叶根和轮缘的等效应力

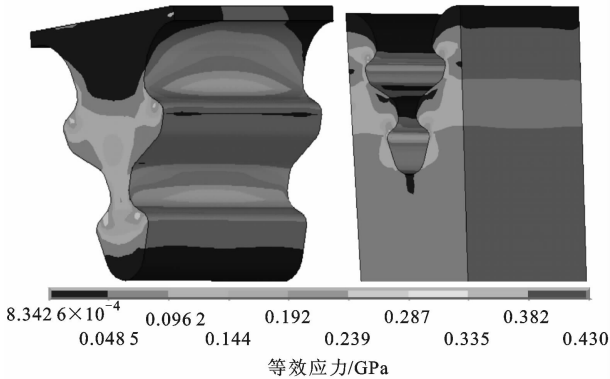


图 10 优化后模型中间叶片叶根和轮缘的等效应力

4 结 论

本文构建了单个及 3 个叶片及对应轮缘的三维接触有限元模型, 并采用多种优化方法对枫树型叶根轮缘的多变量进行了优化, 获得了叶根轮缘优化设计的关键尺寸, 从而大大降低了叶片的叶根轮缘最大等效应力. 通过分析得到的主要结论如下.

(1) 基于单个叶片的叶根轮缘接触模型, 选取了叶根轮缘型线的 7 个特征参数作为设计变量, 并且对比了零阶一阶算法、遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法及模式搜索算法的优化效果. 结果表明, 优化前后叶根轮缘的最大等效应力位置基本不变, 但数值有所减小, 其中遗传算法和模式搜索算法可使叶根轮缘的最大等效应力降幅更大, 二者中模式搜索算法的计算时间更少. 因此, 在综合优化时间和效果两方面因素后, 确定模式搜索算法为解决叶根轮缘优化问题的最优方法.

(2) 为了真实反应叶片在实际工作状态下的应力状况, 采用模式搜索算法对 3 个叶片及对应轮缘模型进行了结构优化, 从而得到了叶根轮缘的优化

型线. 结果表明,叶根和轮缘的最大等效应力分别降低了 11.96%、21.63%,因此优化后的叶根轮缘型线可增强叶片的安全性.

(3)实际叶片的叶根轮缘优化结果表明,本文基于三维接触有限元方法和模式搜索算法的叶根轮缘优化方法具有良好的工程实用价值,可以为工程设计枫树型叶根轮缘提供重要的参考数据.

参考文献:

- [1] 谢永慧,谢浩,袁奇,等. 大功率汽轮机成组长叶片三维振动特性分析[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(5): 54-57.
XIE Yonghui, XIE Hao, YUAN Qi, et al. Three-dimensional vibration analysis of long grouped blade for large power steam turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(5): 54-57.
- [2] 介红恩. 汽轮机断叶片级再制造设计与级扩容研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [3] 涡轮机教研室. 用有限元方法探讨纵树形透平叶根的合理结构[J]. 西安交通大学学报, 1977, 11(2): 59-74.
Turbine Teaching and Research Section. Research on the proper structural of a turbine blade with fir-tree root by finite element method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1977, 11(2): 59-74.
- [4] 邢誉峰, 诸德超. 航空发动机涡轮盘榫槽的形状优化设计[J]. 航空学报, 1995, 16(4): 488-491.
XING Yufeng, ZHU Dechao. Shape optimum design of engine's turbodisk tenon-grooves [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995, 16(4): 488-491.
- [5] MEGUID S A, KANTH P S, CZEKANSKI A. Finite element analysis of fir-tree region in turbine discs [J]. Finite Element in Analysis and Design, 2000, 35(4): 305-317.
- [6] SONG W B, KEANE A, REES J, et al. Turbine blade fir-tree root design optimization using intelligent CAD and finite element analysis [J]. Computer and Structures, 2002, 80(24): 1853-1867.
- [7] 赵海. 涡轮榫头榫槽结构设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [8] 姚利兵, 莫蓉, 刘红军, 等. 基于强度约束的叶片榫头参数化设计[J]. 航空制造技术, 2007(8): 93-95.
YAO Libing, MO Rong, LIU Hongjun, et al. Strength constraint based parameterized design of turbine blade serration [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(8): 93-95.
- [9] 杨敏超, 孙苏亚. 涡轮榫头/榫槽的结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1876-1882.
YANG Minchao, SUN Suya. Structural optimization of turbine tenon/mortise [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1876-1882.
- [10] 孙林松, 王德信, 谢能刚. 接触问题有限元分析方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(3): 18-20.
SUN Linsong, WANG Dexin, XIE Nenggang. A summary of finite element analysis for contact problems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(3): 18-20.
- [11] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册:18 叶片轮盘及主轴强度分析[M]. 北京:航空工业出版社, 2001.
- [12] 张朝晖. ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [13] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial system [M]. Michigan, USA: The University of Michigan Press, 1975.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [15] KIRKPATRICK S, GELATT C D JR, VECCHI M P. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220(11): 650-671.
- [16] 陈卫东, 蔡萌林, 于诗源. 工程优化方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.

[本刊相关文献链接]

- 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14.
- 43"汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98.
- 松装叶片燕尾型叶根干摩擦力模型及振动响应分析. 2009, 43(7): 1-5.
- 离心叶轮几何形变对气动性能的影响. 2009, 43(5): 46-50.
- 后加载和高负荷前加载叶型气动性能的试验研究. 2009, 41(1): 23-27.

(编辑 苗凌)