

文章编号: 1000-8055(2010)08-1876-07

涡轮榫头/榫槽的结构优化设计

杨敏超, 孙苏亚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 建立了一个涡轮榫头/榫槽的一体化结构设计优化系统. 在此优化系统中, 采用榫头/榫槽间隙配合的参数化建模方法. 利用 ANSYS 对结构进行非线性接触分析, 基于二次开发实现了目标函数以及其他相关结果的自动提取. 采用多岛遗传及二次序列规划算法对优化空间进行寻优, 在满足几何约束和强度约束的条件下, 优化降低了最大拉应力值和当量应力值. 实例分析结果表明, 一体化优化设计使涡轮叶片、叶盘性能得到明显的提高, 所建系统稳定、高效, 具有应用于工程实践的可行性和可靠性.

关 键 词: 涡轮; 榫头; 榫槽; 参数化建模; 结构优化设计

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Structural optimization of turbine tenon/mortise

YANG Min chao, SUN Su ya

(School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An integrated optimization design system for turbine tenon/mortise has been set up. In this system, contact clearance was used for parametric modeling of turbine tenon/mortise. Nonlinear contact method was used for analysis of finite element by the strong commercial software of ANSYS which could get objective and other stresses by secondary development of language. Meanwhile, multi-island genetic algorithm and sequential quadratic programming were used for optimization in specified space. As a result, the maximal first principal stress and von mises stress decreased obviously under the condition of meeting the geometry and strength requirements. The system exhibits higher stability, feasibility and efficiency for engineering applications.

Key words: turbine; tenon; mortise; parametric modeling; structural design optimization

涡轮榫头/榫槽结构设计是航空发动机转子部件设计中的重要环节, 该结构设计的合理与否直接关系到转子部件的强度和寿命, 并影响发动机的性能.

根据结构的受力分析, 一个涡轮叶片的根部要承受离心力高达 100~150 kN, 巨大的离心力会造成榫齿断裂, 叶片脱出, 其后果往往是灾难性

的. 而且榫齿圆角半径小, 应力集中现象严重^[1]. 而应力集中现象的存在, 会导致发动机发生疲劳破坏, 从而降低了发动机的寿命. 因此设计出结构合理, 且满足强度要求的叶片/盘的连接结构是发动机设计中的重要环节之一.

为此, 在国外, 诸如罗·罗(Rolls Royce)公司、普惠(Pratt & Whitney)公司和美国通用电气

收稿日期: 2009-06-25; 修订日期: 2009-09-15

作者简介: 杨敏超(1984-), 女, 河北保定人, 硕士生, 主要研究方向为: 强度分析与优化设计.

E-mail: yangminchao_1984@163.com

(General Electric) 公司等均对涡轮的榫头结构设计进行了广泛深入的研究, 并形成了具有各自特点的标准榫头结构设计方法. 而国内对榫头结构的设计, 尤其是在标准榫头结构的设计方面仍缺乏有效的設計方法, 还处于仿制改进阶段, 这给我国的航空发动机自主研制带来了障碍^[2].

本文建立了一个涡轮榫头/ 榫槽一体化结构设计优化系统, 并对一个真实榫头/ 榫槽进行了结构设计优化. 完成的工作主要包括榫头/ 榫槽的参数化建模、结构强度的有限元分析, 采用多学科设计优化软件 iSIGHT 提供的多岛遗传算法及二次序列规划组合算法对优化空间进行寻优, 并对一体化设计优化概念进行实践.

1 涡轮榫头/ 榫槽的参数化建模

参数化设计也称为尺寸驱动. 参数化设计是指设计对象的结构形状比较定型, 可以用一组参数来约定尺寸的关系, 是零部件模型修改和变型设计的需要, 它是 CAD(computer aided design) 技术应用领域内的关键技术之一. 榫头/ 榫槽的参数化, 是优化设计的前提和基础. 设计参数越多, 榫头/ 榫槽可变性越大, 但优化计算工作量成倍增大. 因此为提高优化效率, 通常要求用较少的设计参数能确定出定性合理、可变性较大的榫头/ 榫槽结构^[3-4].

同时, 为了避免在榫槽中出现过盈应力, 结构能够有利于有限元分析, 需要考虑以下两个方面: ①在尺寸驱动过程中, 榫头/ 榫槽的配合存在间隙且不会产生干涉; ②在尺寸驱动过程中, 榫头/ 榫槽结构的榫齿上表面永远贴合在一起, 不会相互嵌入或分离. 图 1 给出了几种不合理的几何设计^[5]. 如情况 ①②, 由于参数不合理导致榫头上齿面过多的嵌入榫槽中或者与其分离, 当两者的距离超出了接触容差范围, 会给有限元的接触分析带来障碍. 情况 ③, 是由于 R_d 太大, 导致结构产生干涉.

在以上分析的基础上, 本文对榫头/ 榫槽结构进行了如下建模(如图 2), 其中 γ 为榫齿非啮合面与垂直于啮合中线的平面之间的夹角, ϕ 为榫齿啮合面与垂直于啮合中线的平面之间的夹角, φ 为榫头的楔形角, F_{trough} 为榫槽槽底转接圆弧半径, R_{trough} , R_{crest} 为榫头的齿底和齿顶转接圆弧半径. 本文中假定榫头、榫槽的 γ 与 ϕ 分别相等实现了两者平行接触, 控制榫头、榫槽的齿顶高和齿底高来保证两者的间隙存在.

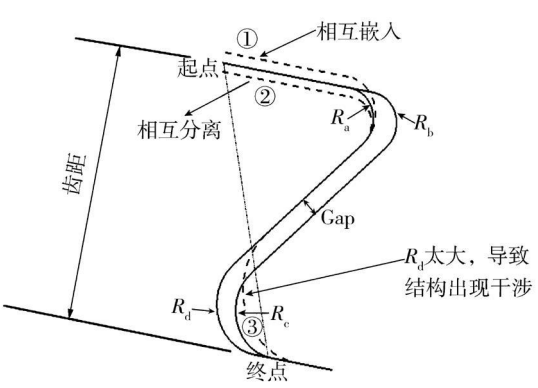


图 1 不合理的几何设计

Fig. 1 Unacceptable geometric design

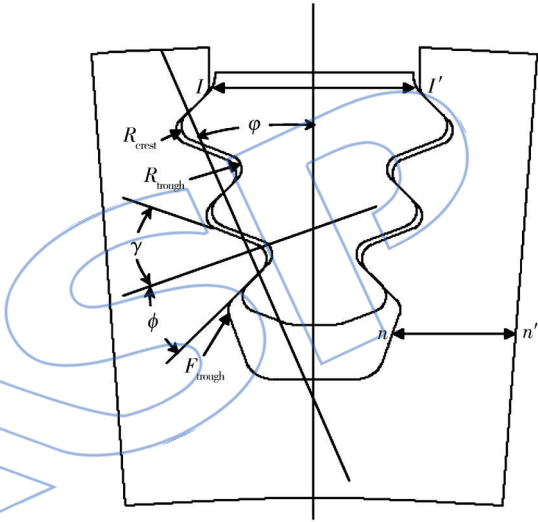


图 2 榫头/ 榫槽的几何参数

Fig. 2 Geometric parameters of tenon/mortise

2 涡轮榫头/ 榫槽有限元分析

由于涡轮盘、涡轮叶片组件具有循环对称性, 所以只选取组件的 $1/41$ (1 个循环对称段) 作为计算模型. 采用 4 节点四边形单元进行网格划分, 对榫头/ 榫槽接触部分进行了细化, 单元类型为 PLANE42, 划分的有限元模型如图 3 所示. 对榫槽的两侧施加循环对称载荷, 榫槽的底部施加周向约束. 本文采用的是修正的拉格朗日乘子法, 对榫头/ 榫槽结构进行非线性面面接触分析.

由于榫头截面的抗弯截面系数大, 故弯曲应力不大, 所以只考虑叶片质量的离心力引起的应力^[6]. 实际工作中, 叶片绕轮盘中心轴旋转, 角速度为 45000 r/min . 叶片上各点的离心力由下式确定

$$F = m \omega^2 R \tag{1}$$

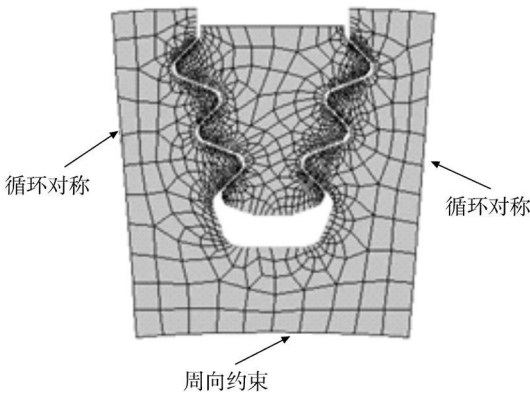


图 3 榫头/榫槽的网格划分和约束条件
Fig. 3 Grid and constraints of tenon/mortise

式中 R 是叶片上各点到发动机旋转轴中心的距离, ω 为角速度, m 为叶身质量. 叶片材料为 DD3 单晶合金, 其材料密度为 8200 kg/m^3 , 涡轮盘材料为 FGH95 粉末冶金合金, 其材料密度为 8275 kg/m^3 . 材料性能数据分别取 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时的值^[7].

3 涡轮榫头/榫槽优化设计过程

3.1 优化问题描述

3.1.1 设计变量和目标函数的选取

本文的设计变量为对应力影响较大的如下 5 个参数(见图 2)^[8-9]:

$$\mathbf{X} = [\gamma \quad \phi \quad R_{\text{crest}} \quad R_{\text{trough}} \quad F_{\text{trough}}]^T$$

目标函数取榫头/榫槽结构的第一主应力和最大当量应力的加权和.

3.1.2 约束条件

强度约束: 榫头 $I-I'$ 截面(图 2)的平均拉伸应力 $\leq$ 许用拉伸应力; 齿面上的挤压应力 $\leq$ 许用挤压应力; 齿的剪切应力 $\leq$ 许用剪切应力; 榫槽 $\pi n'$ 截面(图 2)的平均拉伸应力 $\leq$ 榫槽许用拉伸应力^[10].

3.1.3 优化数学模型的建立

涡轮叶片榫头/榫槽的优化设计问题可表示为如下的数学优化模型:

Minimize:

$$f(\mathbf{X}) = 0.6f_1(\mathbf{X}) + 0.4f_2(\mathbf{X}) \quad (2)$$

Subject to:

$$g_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$\mathbf{X} = [\gamma \quad \phi \quad R_{\text{crest}} \quad R_{\text{trough}} \quad F_{\text{trough}}]^T$$

式中 f 为目标函数, $f_1(\mathbf{X})$ 为第一主应力值, $f_2(\mathbf{X})$ 为最大当量应力值, $\mathbf{X}$ 为设计变量, g_i 为约束条件.

3.2 优化的实现

3.2.1 响应面模型的建立

为了减少优化设计的周期, 在优化过程中采用响应面模型, 在不降低精度的情况下, 构造一个计算量小、计算结果与实际仿真结果相近的数学模型来代替实际仿真程序, 采用多岛遗传算法在仿真模型上寻优得到最优值后, 以此作为初始值在实际模型上利用逐步二次规划法寻优, 得到最佳结果. 具体优化流程(图 4)如下所示^[11-12].

- 1) DOE (design of experiment) 研究: 探索设计空间, 选择样本点, 选择最具影响力的变量作为设计变量.
- 2) 近似分析: 目标与约束的近似, 即通过 DOE 的分析结果构造初始响应面模型.
- 3) 基于响应面模型的遗传算法和序列二次规划综合寻优搜索, 将设计空间的全局寻优与局部深层次寻优相结合.
- 4) 更新模型: 拟合并使用响应面模型, 通过实际仿真分析更新模型、提高精度.

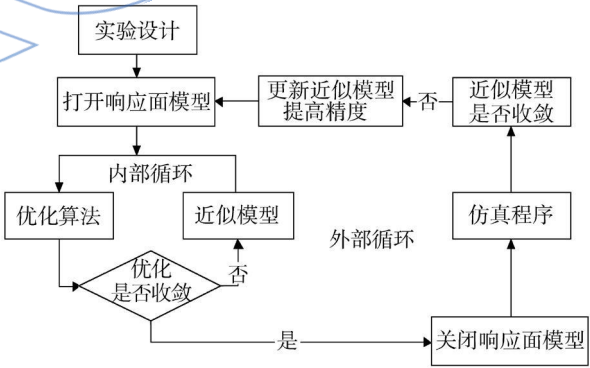


图 4 基于响应面模型的优化流程
Fig. 4 Flow of optimization based on response surface model

3.2.2 优化的流程

本文基于 Unigraphics NX3.0(UG NX3.0)建立了某航空发动机涡轮榫头/榫槽的参数化 CAD 模型, 利用 UG 二次开发工具 Open API 编写了更新几何模型的关键程序 update.exe, 此程序实现了两个模型同时自动更新的功能. 模型在大型有限元分析软件 ANSYS 10.0 中进行非线性接触分析, 利用 APDL(ANSYS parametric de-

sign language) 语言自动提取有限元分析后得到的应力值, 如剪切应力值, 挤压应力值, 主应力值, 当量应力等, 将其存储在 output. txt 文件中. 开发软件数据接口程序, 将两者集成到优化软件中

进行解析, 即指定各个参数在文件中的位置, 以便软件在运行时能找到所需要的参数. 最后通过选取多岛遗传算法及二次数列规划组合算法在优化空间寻优, 如图 5 所示.

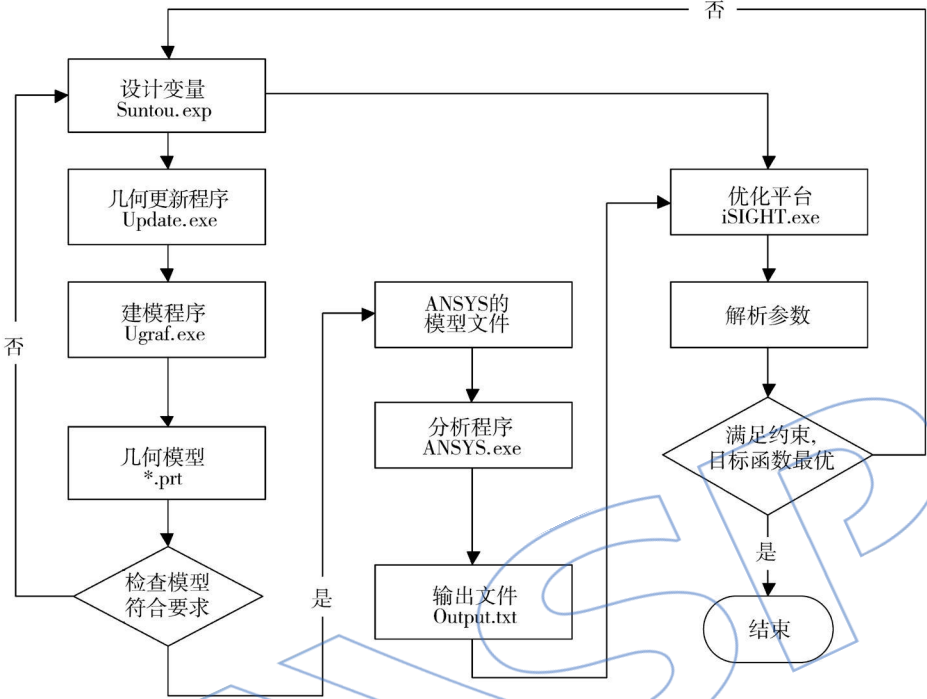


图 5 榫头/ 榫槽结构设计优化流程图

Fig. 5 Flow chart of structural design optimization for tenon/ mortise

3.3 优化结果及其分析

优化前后的设计变量、目标函数和榫头/ 榫槽型线如表 1、表 2 及图 6 所示, 同时给出了目标函数在寻优过程中变化趋势, 如图 7 所示. 通过优化前后的榫头/ 榫槽的各项性能比较可见, 榫头的最大当量应力降低了 29. 5%, 第一主应力降低了 29. 4%; 榫槽的最大当量应力降低了 32. 5%, 第一主应力降低了 32. 7%. 从图 8、图 9 可以看出榫

头/ 榫槽结构的最大应力发生在了榫槽底部过渡圆弧处, 优化后圆弧处的应力有了明显的降低. 第一主应力和当量应力的减小, 不但可以延长发动机寿命, 同时在增加转速的情况下, 发动机不会发生故障. 虽然齿面上的挤压应力有所增加, 但从图 10 可以看出接触面处的挤压应力分布更加均匀, 从而避免产生过高的挤压应力影响发动机的寿命^[13].

表 1 设计变量优化前后比较

Table 1 Comparison of design variables before and after optimization

设计变量	初始值	设计上限	设计下限	优化后的值
$\gamma/ (^{\circ})$	40. 375	45	35	36. 96
$\phi/ (^{\circ})$	25. 235	35	18	30. 0
R_{crest}/mm	0. 45	0. 8	0. 3	0. 600 6
R_{trough}/mm	0. 4	0. 8	0. 3	0. 6
F_{trough}/mm	0. 4	1. 5	0. 2	1. 159 26

表 2 目标函数优化前后比较

Table 2 Comparison of objective before and after optimization

目标函数	优化前的值		优化后的值	
	榫头	榫槽	榫头	榫槽
第一主应力/MPa	712	1004	502	677.1
当量应力/MPa	701	988.215	495	664.7
加权值/MPa	705	994.52	497.8	669.6

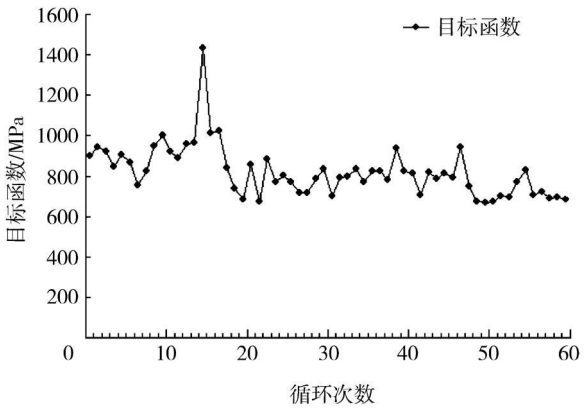


图 7 目标函数的迭代情况
Fig. 7 Trend of objective

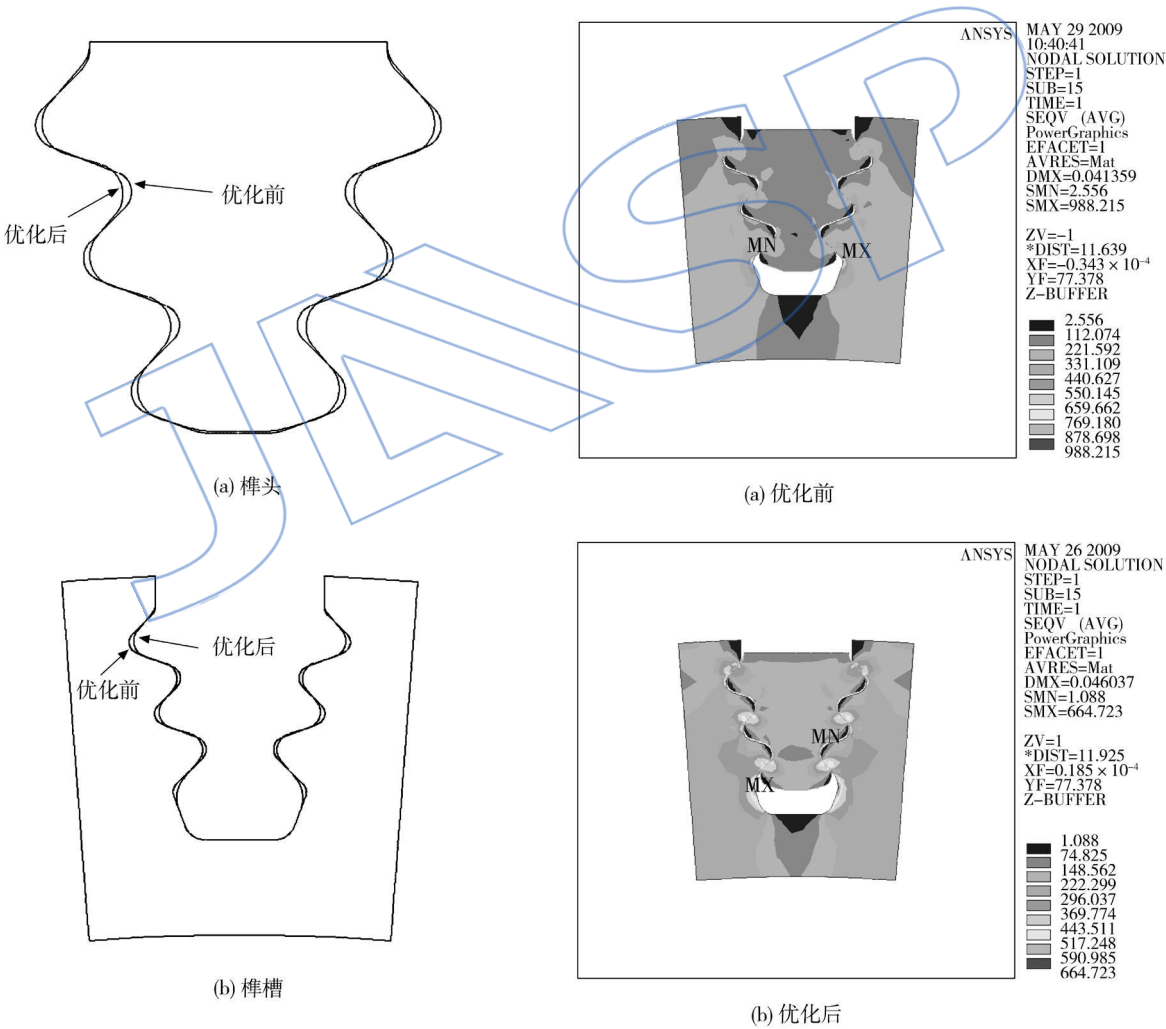


图 6 优化前后榫头、榫槽型线的比较
Fig.6 Comparison of profile lines of tenon/ mortise before and after optimization

图 8 优化前后的当量应力云图
Fig.8 Contour of von mises stress before and after optimization

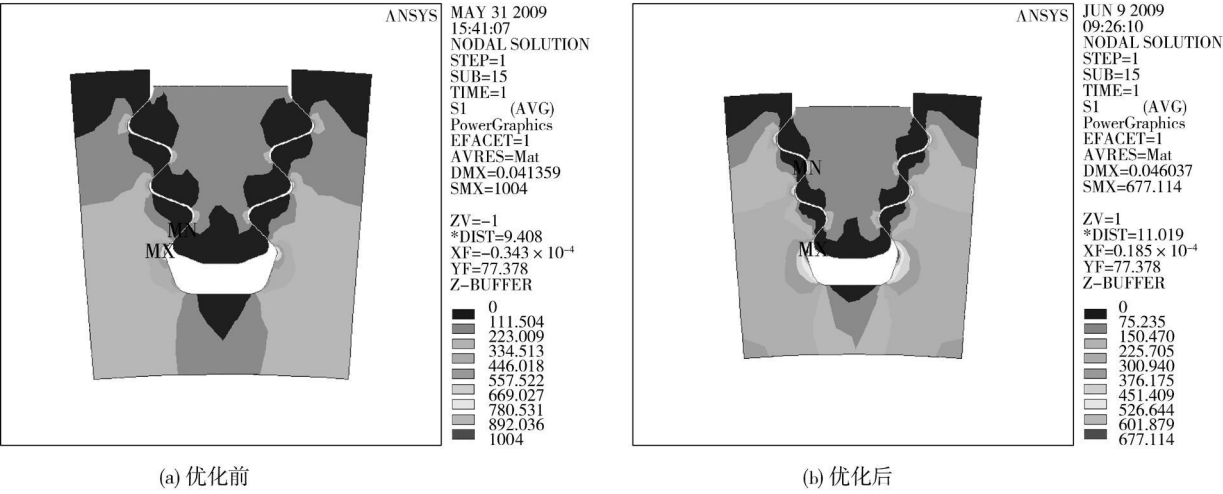


图 9 优化前后的第一主应力云图

Fig. 9 Contour of the first principal stress before and after optimization

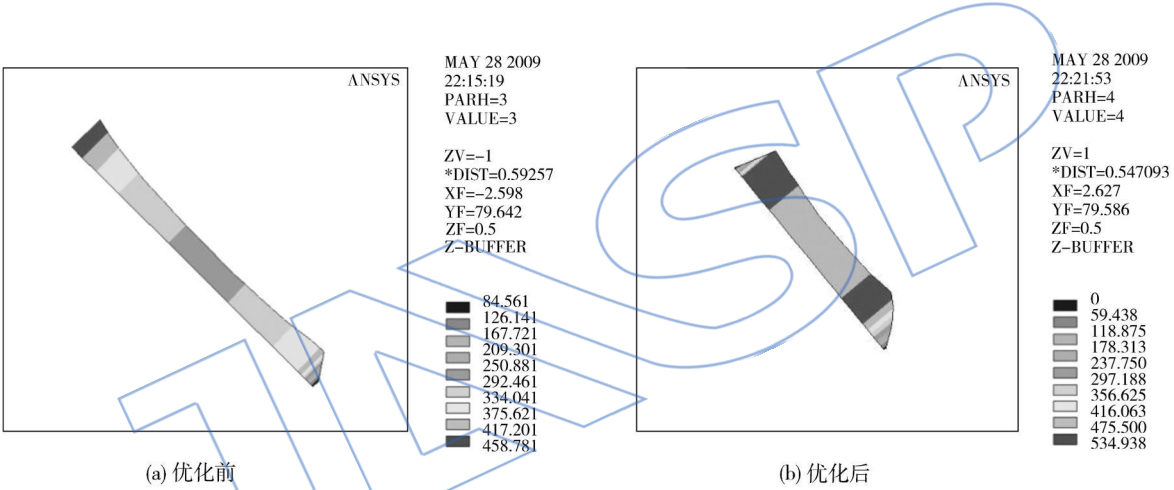


图 10 优化前后第二齿面的挤压应力分布

Fig. 10 Contour of contact stress on the second tooth before and after optimization

4 结 论

本文以某型航空发动机涡轮榫头/榫槽为例研究了此类零件的参数化建模方法,建立了榫头/榫槽的一体化结构优化系统. 参数化过程中考虑了结构的间隙配合,尺寸驱动能够避免结构产生干涉;采用修正的拉格朗日乘子法,对结构进行非线性接触分析. 通过二次开发语言自动提取有限元分析得到的相应应力值;开发软件数据接口程序,在优化平台下实现涡轮榫头/榫槽的结构优化设计集成,完成了结构的优化设计,明显地降低了结构的当量应力和主应力. 在该系统中进行的设计优化结果对涡轮叶片、叶盘整体性能的提高具有一定的参考价值. 同时,此系统具有应用于工程实践的可行性及可靠性.

参考文献:

[1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册. 第 18 册,叶片轮盘及主轴强度分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[2] 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.

ZHAO Hai. Research on design method of turbine tenon/ mortise[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[3] 王婧超, 李立州, 岳珠峰. 涡轮叶片的多学科设计优化系统[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 23-29.

WANG Jingchao, LI Lizhou, YUE Zhufeng. Multidisciplinary optimization design system for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 23-29. (in Chinese)

[4] 虞跨海, 岳珠峰. 涡轮冷却叶片参数化建模及多学科设计

- 优化[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1346-1351.
- YU Kuahai, YU E Zhufeng. Parametric modeling and multidisciplinary design optimization for cooling turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1346-1351. (in Chinese)
- [5] Song W, Keane A, Rees J, et al. Turbine blade fir tree root design optimization using intelligent CAD and finite element analysis[J]. Computer and Structure, 2002, 80: 1853-1867.
- [6] 吕文林. 航空发动机强度计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [7] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京: 中国航空发动机总公司, 1997.
- [8] Meguid S A, Kanth P S, Czekanski A. Finite element analysis of fir tree region in turbine discs[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 35(4): 305-317.
- [9] Papanikos P, Meguid S A, Stjepanovic Z. Three dimensional nonlinear finite element analysis of dovetail joints in aeroengine discs[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1998, 29: 173-186.
- [10] 陈开军, 马枚. 航空发动机叶片榫头优化设计研究[J]. 航空动力学报, 1995, 10(2): 190-192.
- CHEN Kaijun, MA Mei. Optimization of turbine blade fir tree roots[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(2): 190-192. (in Chinese)
- [11] Engineous Software, Inc. ISIGHT 8.0[M]. 北京: 赛特达科技有限公司, 2003.
- [12] 韩永志, 高行山, 李立州, 等. 基于 Kriging 模型的涡轮叶片多学科设计优化[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1055-1059.
- HAN Yongzhi, GAO Hangshan, LI Lizhou, et al. Kriging model based multidisciplinary design optimization for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1055-1059. (in Chinese)
- [13] 刘廷毅, 伊峰, 张峻峰. 航空发动机圆弧型榫头型面优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 288-291.
- LIU Tingyi, YI Feng, ZHANG Junfeng. Optimization for arc contact face of swallow-tailed root[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(3): 288-291. (in Chinese)