

基于坐标关联法的榫连接结构优化设计

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: 为解决结构优化设计过程中由于几何尺寸干涉而导致的优化过程中断问题, 提出并建立一种适于优化设计的结构建模方法——坐标关联法, 将该方法应用于航空发动机榫连接结构的优化设计, 整个优化过程顺畅, 连续完成几何建模 790 次, 未出现由于几何尺寸改变而发生的结构模型无法生成的问题。优化设计结果表明: 优化前后的榫连接结构形状虽然变化不大, 但最大应力点——榫槽喉部最大应力降幅达 19.1%, 应力水平降低明显, 且结构造型符合工程要求。

关 键 词: 坐标关联法; 榫连接结构; 有限元分析; 优化设计; 优化过程中断

中图分类号: V215.2

文献标志码: A

Optimization design of tenon connection structure based on coordinate correlation method

HAO Yan-hua, HUANG Zhi-jian

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

Abstract: To solve the problem about the design optimization process interruption due to geometric dimensional interference in the process of structure optimization design, a method (coordinate correlation method) was established, making suitable for optimization design of structure modeling. This method was applied to aeroengine tenon connection structure optimization design; the process was smooth, and structural modeling of 790 times was completed without any problems due to geometric changes. The optimization design results show that the maximum stress on the groove throat area drops by 19.1% though the changes before and after optimization of tenon connection structure shape are not big. The stress levels are significantly lower, and the structure model meets the engineering requirements.

Key words: coordinate correlation method; tenon connection structure; finite element analysis; optimization design; optimization process interruption

随着大型商业化有限元分析软件的不断发展, 对结构的优化设计变得越来越容易^[1-3]。但在实际应用过程中, 在可行域范围内, 对于较复杂结构的优化过程中途经常会异常中断。主要原因是如果利用有限元前处理软件进行简单的结构建模, 由于结构变量的改变, 可能会发生结构轮廓无法生成, 或者说发生几何尺寸干涉现象^[4]。针对这一问题, 本文以航空发动机榫连接结构为例, 提出

并建立了一种可使结构优化过程顺畅进行的结构几何建模方法——坐标关联法。该方法理论上实现起来简单, 易操作, 完全可避免出现优化设计过程中的几何尺寸干涉现象, 具有较强的工程实用性。

航空发动机转子叶片与轮盘通常采用榫头/榫槽结构形式连接, 榫连接结构形式有单齿燕尾榫, 二齿、三齿或五齿的枞树型榫^[5-6]。榫连接结构

主要承受叶片以及自身的离心载荷作用,结构薄弱环节通常在榫头/榫槽喉部应力集中部位^[7-9]。为能清楚说明坐标关联法的建模思想,本文以单齿燕尾榫为例,以降低榫头/榫槽喉部应力集中为目标,阐述榫连接结构的优化设计。

1 坐标关联法

榫连接结构的优化设计,首先要实现对榫头/榫槽结构进行参数化形状描述,即通过某些参数的制定来控制结构的变化,从而实现结构形状的变化随优化的寻优过程不断更新^[10]。通常单齿燕尾榫的优化设计变量取自于设计图纸的标注尺寸,如图 1 所示,因为它能全面描述榫头/榫槽的结构形状,来源简单而直观。然而,当实施结构的优化设计时,很可能出现几何尺寸的相互干涉而无法生成结构图,导致优化计算中途中断。

坐标关联法的建模思想为:对于单齿燕尾榫的二维剖面结构,其轮廓线均由若干个直线段和圆弧段的头尾相切或相交组合而成,这些交点和切点称为特征点。轮廓线上相邻的特征点之间均存在一定的关联关系,因此,可根据特征点的关联关系,沿着结构边界依次建立前后特征点之间相关联的数学表达式,进而实现榫头/榫槽结构的全部轮廓线参数化描述。这种利用相邻特征点坐标间关联关系建立的二维结构图适应性强,不会因为优化设计变量的改变而产生轮廓线之间的干涉问题。同时,这种坐标关联法还适合榫头/榫槽有相互配合关系的特征点间的关联计算。

要合理地描述榫头/榫槽工作配合时的关联

关系,必须首先依据结构设计要求确定合适的优化设计变量,如图 2 所示,然后依次建立特征点之间的坐标关联公式。榫头/榫槽上所有特征点的排列序号及其位置见图 3。

坐标原点取在航空发动机轴线上,y 坐标为径向方向,且通过榫头/榫槽的对称面,建立坐标系如图 2 所示。依据图 2 中的优化设计变量,可建立图 3 所示榫头特征点的坐标表达式为

$$\begin{cases} x_3 = \frac{B_1}{2} - \frac{L_j}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \\ y_3 = H_2 + \frac{L_j}{2} \cdot \cos \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_3 - R_1 \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right) \\ y_2 = y_3 + R_1 \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \\ y_1 = H_2 + H_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_4 = x_3 + L_j \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \\ y_4 = y_3 - L_j \cdot \cos \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_5 = x_4 + R_2 \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right) \\ y_5 = y_4 - R_2 \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_6 = x_5 \\ y_6 = y_5 - H_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_7 = x_6 - R_3 \cdot (1 - \sin \alpha_2) \\ y_7 = y_6 - R_3 \cdot \cos \alpha_2 \end{cases} \quad (7)$$

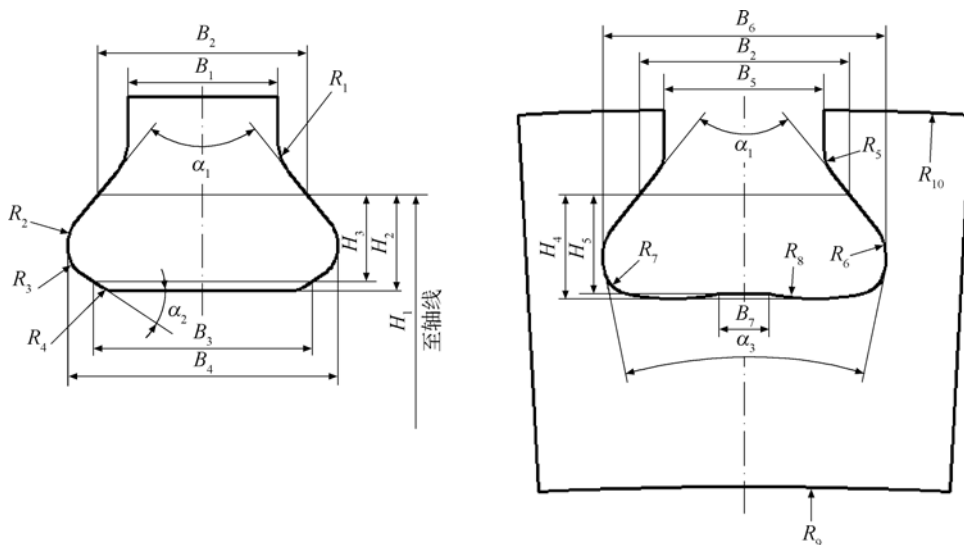


图 1 榫头/榫槽结构尺寸

Fig. 1 Tenon/groove structure dimension

$$\begin{cases} x_{8-9} = x_3 + \delta \cdot (x_4 - x_3) \\ y_{8-9} = y_7 - (x_7 - x_{8-9}) \cdot \tan \alpha_2 \end{cases} \quad (8)$$

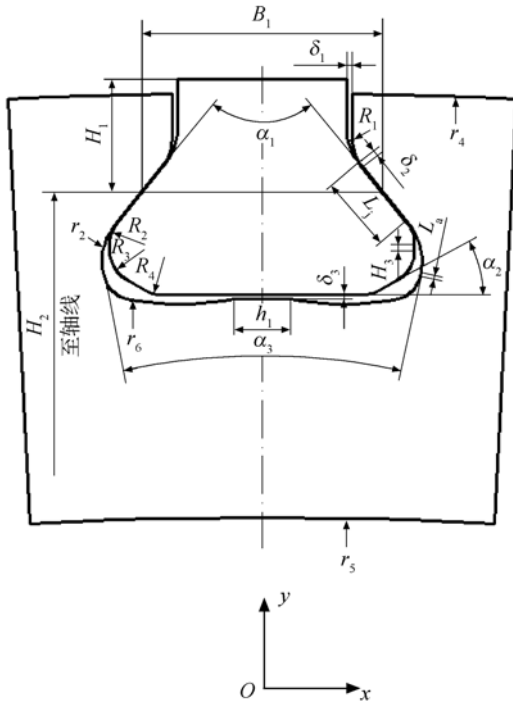


图2 榫头/榫槽优化设计变量

Fig. 2 Optimization design variables of tenon/groove

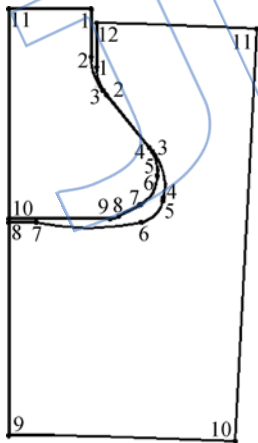


图3 榫头/榫槽特征点序号

Fig. 3 Order numbers of tenon/groove feature points

其中 δ 为榫底结构系数。

$$\text{令 } D = R_4 \cdot \tan \frac{\alpha_2}{2}$$

$$\begin{cases} x_8 = x_{8-9} + D \cdot \cos \alpha_2 \\ y_8 = y_{8-9} + D \cdot \sin \alpha_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_9 = x_{8-9} - D \\ y_9 = y_{8-9} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_{10} = 0 \\ y_{10} = y_9 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_{11} = 0 \\ y_{11} = y_1 \end{cases} \quad (12)$$

根据图3中特征点之间的线段特点,结合图2中的线段和半径尺寸,通过式(1)~式(12)计算出的坐标点,即可生成不会发生几何尺寸干涉现象的榫头外轮廓线。

同样,榫槽特征点的坐标(坐标符号上角标加“c”以示与榫头坐标的区别)表达式为

$$r_1 = R_1 - \frac{\delta_1 - \delta \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2}}{1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_1^c = x_2 + \delta_1 \\ y_1^c = y_3 - \delta_2 \cdot \cos \frac{\alpha_1}{2} + r_1 \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} x_2^c = x_1^c + r_1 \cdot \left(1 - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right) \\ y_2^c = y_1^c - r_1 \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_3^c = x_2^c + L_j \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \\ y_3^c = y_2^c - L_j \cdot \cos \frac{\alpha_1}{2} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_4^c = x_3^c + r_2 \cdot \left(\cos \frac{\alpha_3}{2} - \cos \frac{\alpha_1}{2}\right) \\ y_4^c = y_3^c - r_2 \cdot \left(\sin \frac{\alpha_3}{2} + \sin \frac{\alpha_1}{2}\right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_5^c = x_4^c - L_a \cdot \sin \frac{\alpha_3}{2} \\ y_5^c = y_4^c - L_a \cdot \cos \frac{\alpha_3}{2} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} y_6^c = y_9 - \delta_3 \\ x_6^c = x_5^c - r_6 \cdot \cos \frac{\alpha_3}{2} + \\ \sqrt{r_6^2 - \left[r_6 \cdot \sin \frac{\alpha_3}{2} + (y_5^c - y_6^c)\right]^2} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} x_7^c = \frac{h_1}{2} \\ y_7^c = y_9 - \delta_3 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_8^c = 0 \\ y_8^c = y_7^c \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} x_9^c = 0 \\ y_9^c = r_5 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} x_{i0}^c = r_5 \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} \\ y_{i0}^c = r_5 \cdot \cos \frac{\alpha_i}{2} \end{cases} \quad (23)$$

其中 $\alpha_i = \frac{360^\circ}{N}$, N 为叶片数.

$$\begin{cases} x_{i1}^c = r_4 \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} \\ y_{i1}^c = r_4 \cdot \cos \frac{\alpha_i}{2} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} x_{i2}^c = x_i^c \\ y_{i2}^c = \sqrt{r_4^2 - (x_i^c)^2} \end{cases} \quad (25)$$

2 几何建模及优化设计的实现

通过对 ANSYS 软件的二次开发实现榫连接结构的优化设计^[11].

几何建模及应力分析均使用 ANSYS 软件的有限元分析功能^[12]. 考虑到对称性, 取榫头/榫槽连接结构的 1/2 扇区为研究对象(见图 3), 1/2 扇区的两个侧面施加法向位移约束, 榫头与榫槽之间采用接触边界条件; 外载荷仅考虑离心载荷的影响, 叶片载荷以分布载荷形式施加在榫头喉部上端面; 单元类型选用八节点四边形平面应变单元 PLANE82. 利用 APDL 语言编制 ANSYS 几何建模及有限元分析命令流^[13-14].

优化设计算法采用复合形法^[15], 在自编的优化设计程序中调用 ANSYS 建模及有限元分析命令流.

2.1 目标函数

优化设计目标为榫头/榫槽喉部最大应力最小. 若榫头喉部的最大应力用 σ_{tmax} 表示, 榫槽喉部的最大应力用 σ_{cmax} 表示, 则目标函数为

$$\min f(X) = \sigma_{tmax} + \sigma_{cmax} \quad (26)$$

2.2 优化设计变量

原则上, 图 2 中的全部标注尺寸均可设为优化设计变量, 但有些尺寸是结构不允许改变的, 有些变量对应力敏感度不高. 因而通常可参照设计算例中确定的变量选取.

2.3 约束条件

优化过程中, 不仅限定各优化设计变量的上下限, 还需要分别对榫头/榫槽的喉部最大应力、喉部平均拉伸应力、接触面平均挤压应力进行限制^[16]. 在不同优化设计变量的上下限以及上述 3 种应力约束所确定的可行域内, 均可优化出一种最优榫连接结构.

3 设计算例

对某航空发动机转子叶片的榫头/榫槽连接结构进行含有接触分析的结构优化设计. 主要结构尺寸如下: $H_2 = 253.8 \text{ mm}$, $r_4 = 259 \text{ mm}$, $r_5 = 60 \text{ mm}$, 取 6 个优化设计变量, 见表 1; 叶片和轮盘材料均为 TC4 钛合金^[17], 密度为 4440 kg/m^3 , 弹性模量为 109 GPa , 泊松比为 0.3 , 屈服应力为 825 MPa ; 工作转速为 9000 r/min , 叶片喉部上端面以上离心力为 53.69 kN . 约束条件如下^[18]: 榫头/榫槽喉部最大应力小于 825 MPa , 喉部平均拉伸应力和接触面平均挤压应力均小于 358 MPa .

整个优化过程先后进入结构造型并开展有限元分析达 790 次, 未出现任何几何尺寸干涉等异常现象. 榫连接结构优化前后设计变量对比见表 1, 结构对比见图 4, 应力结果对比见表 2, 优化前后榫连接结构应力分布分别见图 5 和图 6.

由表 1 和图 4 可见, 优化前后榫连接结构几何尺寸变化不大. 由表 2、图 5 和图 6 可见, 优化前后应力均在约束条件限制范围内; 优化前后榫槽喉部最大应力分别为 398 MPa 和 322 MPa , 降幅为 19.1% .

表 1 榫连接结构优化前后设计变量对比

Table 1 Design variables comparison of tenon connection structure before and after optimization

变量	数值	
	优化前	优化后
B_1/mm	12.6	11.5628
R_1/mm	3	2.8671
r_2/mm	3	2.9875
$\alpha_1/(\circ)$	78	80.8726
$\alpha_2/(\circ)$	21	33.4951
$\alpha_3/(\circ)$	20	23.0257

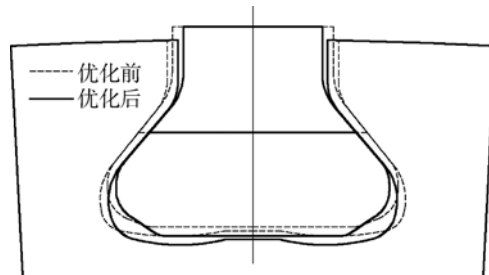


图 4 榫连接结构优化前后结构对比

Fig. 4 Structure comparison of tenon connection structure before and after optimization

表2 榫连接结构优化前后应力结果对比(单位:MPa)

Table 2 Stress results comparison of tenon connection structure before and after optimization (unit:MPa)

	优化前	优化后
榫头喉部最大应力	285	286
榫槽喉部最大应力	398	322
榫头喉部平均拉伸应力	109	126
榫槽喉部平均拉伸应力	127	114
接触面平均挤压应力	217	209

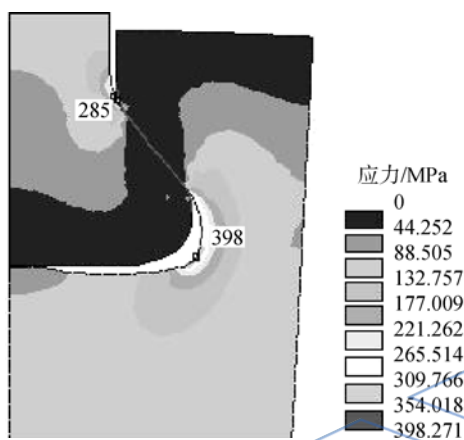


图5 优化前榫连接结构应力分布

Fig. 5 Stress distribution of tenon connection structure before optimization

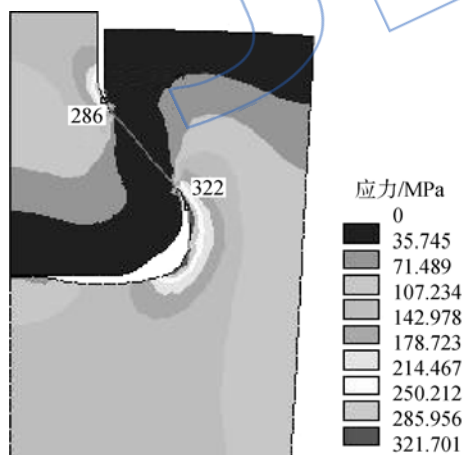


图6 优化后榫连接结构应力分布

Fig. 6 Stress distribution of tenon connection structure after optimization

4 结论

1) 采用坐标关联法构造出的单齿燕尾榫连接结构未出现过任何参数化造型干涉问题。构造

出的单齿燕尾榫连接结构准确、可靠,具有很强的工程实用性。

2) 榫头/榫槽喉部最大应力的优化结果表明,榫连接的结构尺寸虽然变化不大,但榫槽喉部最大应力降低较为明显,且满足约束条件,说明榫连接结构优化设计是必要的。

3) 虽然优化目标同时追踪榫头/榫槽喉部最大应力,但榫槽喉部最大应力始终大于榫头喉部最大应力。

参考文献:

- [1] 吕辉停,郝艳华,黄致建,等. 弧形燕尾榫结构设计及形状优化[J]. 航空动力学报,2011,26(6):1295-1300.
LÜ Huiting, HAO Yanhua, HUANG Zhijian, et al. Structure design and shape optimization in arc dovetail[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1295-1300. (in Chinese)
- [2] 杨伟,郝艳华,黄致建. 圆弧榫风扇盘结构的优化设计[J]. 华侨大学学报,2013,34(6):601-604.
YANG Wei, HAO Yanhua, HUANG Zhijian. Structure optimization design of arc tenon fan disc[J]. Journal of Huaqiao University, 2013, 34(6): 601-604. (in Chinese)
- [3] 胡仁喜,王庆五,闫石. ANSYS 8.2 机械设计高级应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 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. (in Chinese)
- [5] 刘长福,邓明. 航空发动机结构设计分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [6] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [7] 李宏新,黄致建,张力,等. 一种排除带凸肩风扇叶片榫头故障的新方法[J]. 航空发动机,2002(2):27-30.
LI Hongxin, HUANG Zhijian, ZHANG Li, et al. New technique for eliminating fault of the tenon of fan blade with mid-span shroud[J]. Aeroengine, 2002(2): 27-30. (in Chinese)
- [8] 饶寿期,徐鹤山. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则:第3册 叶片[R]. 北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.
- [9] 吕文林,陈俊粤. 航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则:第2册 轮盘[R]. 北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.
- [10] 刘惟信,孟嗣宗. 机械最优化设计[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [11] 师访. ANSYS 二次开发及应用详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [12] 莫维尼. 有限元分析:ANSYS 理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.

- [13] 张涛. ANSYS APDL 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,2013.
- [14] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 孙全颖. 机械优化设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [16] 尹泽勇,欧园霞,任培正,等. 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.
- [17] 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:航空工业出版社,1990.
- [18] 罗尔斯-罗伊斯公司. EGD-3 斯贝 Mk202 发动机应力标准[S]. 丁爱祥,吴君,译. 北京:国际航空编辑部,1979.

JALSP