

文章编号:1000-8055(2011)06-1295-06

弧形燕尾榫结构设计及形状优化

吕辉停, 郝艳华, 黄致建, 吴福仙

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 为了设计弧形燕尾榫结构,对弧形燕尾型榫及叶片/榫头连接部位的三角过渡段进行研究,设计一种新的叶根型线.在上述工作基础上,建立了叶根型线与榫头顶面的尺寸约束关系,利用 ANSYS 软件建立叶片/榫头参数化模型,并开展榫头结构及叶根型线的优化设计,结果表明优化后的新结构叶背处的应力为 827.11 MPa,比原结构下降 6.51%;新结构的叶片/榫头质量为 0.869 42 kg,比原结构下降 1.85%;新结构叶背喉部、叶盆喉部、叶身的应力分布比较均匀,三者之间应力梯度较小.综上所述,优化后的叶根型线结构比原叶片/榫头结构叶根型线结构更好.

关 键 词: 弧形燕尾型榫;三角过渡段;叶根型线;尺寸约束;优化设计

中图分类号: V215.2

文献标志码: A

Structure design and shape optimization in arc dovetail

LÜ Hui-ting, HAO Yan-hua, HUANG Zhi-jian, WU Fu-xian

(College of Mechanical and Automation,

Huaqiao University, Xiamen Fujian, 361021, China)

Abstract: In order to design the structure of arc dovetail, and analyze arc dovetail and triangle transition structure in the joint of blade and dovetail, a new type of blade profile was designed. Based on aforementioned work, size constraint relations between the blade profile and dovetail's top face were built, the blade and dovetail's parameter model was created using ANSYS software, and the blade profile and dovetail's structure were optimized. The results indicate that the optimized back stress of the new structure is 827.11 MPa, down by 6.51% than the original structure; the quality of new structure of the blade/dovetail is 0.869 42 kg, down by 1.85% than the original structure; the distribution of stress is more uniform and stress gradient is smaller among dorsal throat, leaves basin throat and leaves body. On the whole, the blade profile of optimal blade and dovetail structure is better as compared with that of initial blade and dovetail structure.

Key words: arc dovetail; triangle transition structure; blade profile; size constraint; optimization design

由于发动机燕尾型榫头承受叶片质量离心力和气动力的合成弯矩,同时还要考虑榫头/榫槽的接触应力^[1-4],使榫头/榫槽连接部分产生较为严重的应力集中.据统计资料表明,航空发动机故障中高达 20% 是由于榫头/榫槽结构失效引起

的^[5-6].文献[7]选取榫头齿颈宽和齿面倾斜角为设计变量,对某发动机燕尾型榫头/榫槽接触结构进行了可靠性形状优化分析.文献[8]以榫头造型参数为设计变量,以最大应力为目标优化榫头参数.文献[9]对榫头型面进行优化设计.以上都是

收稿日期:2010-05-24; 修订日期:2010-10-23

作者简介:吕辉停(1985—),男,福建厦门人,硕士生,主要从事计算机辅助设计与分析.

通讯作者:郝艳华(1962—),女,研究员,主要从事计算机辅助机械设计研究. E-mail:haoyh@hqu.edu.cn

只通过优化榫头截面结构尺寸来降低榫头喉部最大应力,没有考虑榫头的轴向形状、叶片与榫头的相对位置关系及叶片/榫头质量等问题,因而不能准确地反映叶片/榫头的应力状况和发动机的综合性能。

本文研究的是大涵道比的涡轮风扇发动机中的弧形燕尾型榫。该榫连接类型已经在英国罗尔斯·罗伊斯公司的发动机上使用,如 RB211-535E4 等发动机。在这类榫连接中,榫头顶面的外形基本做成与叶根型面的外形一致而呈圆弧,因此本文根据叶片与榫头连接部位的三角过渡段结构(如图 1 所示)不影响气动性能的特点,在与榫头顶面搭接处设计了一种新的叶根型线(如图 2 所示),在 ANSYS 中建立叶片/榫头参数化模型并进行

了形状优化,获得的最优结构的质量及榫头喉部最大拉应力比原结构都有不同程度的下降,并且新结构的应力分布更加均匀。

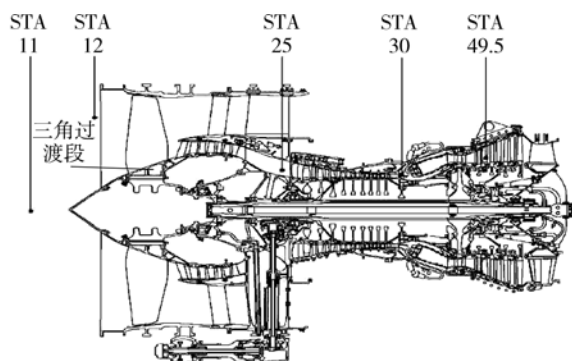


图 1 发动机中的三角过渡段位置

Fig. 1 Triangle transition structure in engine

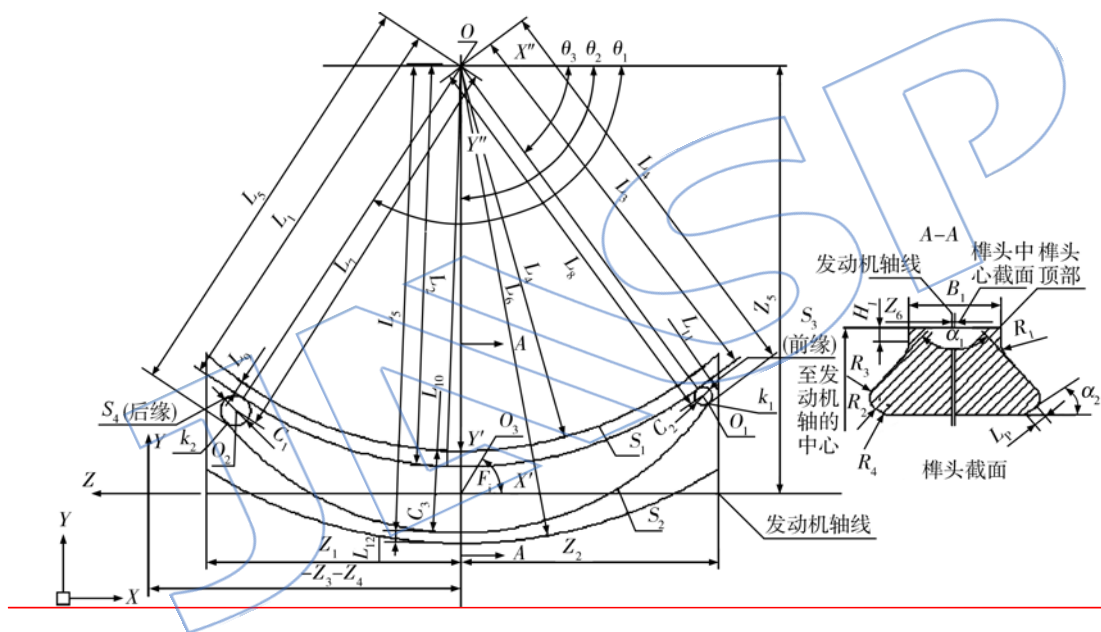


图 2 叶根型线与榫头结构图

Fig. 2 Blade profile and dovetail structure

1 弧形燕尾榫结构设计

在弧形燕尾榫结构设计中,要求榫头顶面包络整个叶根型线且满足强度要求是叶根型线与榫头设计的难点和要点。一般解决方法是选取榫头顶面较大的榫头截面,然后根据叶片叶型的中弧线所在的圆弧扫掠成榫头,但这种方法不利于榫头设计,并且获得榫头质量较重。本文通过建立叶根型线与榫头顶面的尺寸约束关系来解决。

1.1 与榫头顶面搭接叶根型线设计

考虑叶根型线应是光滑无拐点,具有一阶、二阶几何连续的性质,与榫头顶面搭接的叶根型线采用三点建圆弧曲线的方法。选用 L^* 参数(共 18

个)创建圆弧曲线和榫头顶面与圆弧曲线的尺寸约束关系,如图 2 所示。其中 $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, C_1, C_2, C_3, L_9, L_{10}, L_{11}$ 之间的函数关系如公式(1)所示

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L_a + L_9 \\ L_2 &= L_a + L_{10} \\ L_3 &= L_a + L_{11} \\ L_4 &= L_3 + C_2 \\ L_5 &= L_2 + C_3 \\ L_6 &= L_1 + C_1 \\ L_7 &= L_1 + C_1/2 \\ L_8 &= L_3 + C_2/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

L_a 为榫头盆侧的边界尺寸,参考公式(2), C_1, C_2

分别为后缘、前缘半径, C_3 为叶型最大厚度, L_9 , L_{10} , L_{11} 分别是尺寸约束值, 其中 $L^* = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6 \ L_7 \ L_8 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \ L_9 \ L_{10} \ L_{11} \ L_{12}]^T$.

1.2 叶根型线的建模方法

在参考点 $O(0, Z_5, -Z_3 - Z_4)$ 建立柱坐标系 $X''Y''$, 如图 2 所示. 在该坐标系分别建立圆弧曲线所需的 6 个点坐标 (L_1, θ_1) , (L_2, θ_2) , (L_3, θ_3) , (L_4, θ_3) , (L_5, θ_2) , (L_6, θ_1) , 通过三点建立圆弧的方法建立圆弧曲线 S_1 (叶盆)、 S_2 (叶背).

1.3 前缘与后缘角的建模方法

首先建立前缘的圆心坐标 $O_1(L_8, \theta_3)$, 通过圆心 O_1 和圆弧曲线 S_1 的右端点建圆, 该圆过圆弧曲线 S_2 的右端点, 同时删除内侧的半圆弧, 得到半圆弧 S_3 . 同理, 通过后缘的圆心坐标 $O_2(L_7, \theta_1)$ 和圆弧曲线 S_1 的左端点建圆, 该圆过圆弧曲线 S_2 的左端点, 同时删除内侧的半圆弧, 得到半圆弧 S_4 , 见图 3 所示.

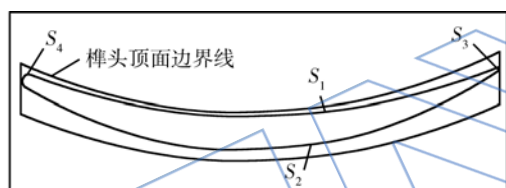


图 3 新的叶根型线与榫头顶面在 ANSYS 的生成情况

Fig. 3 New blade profile and dovetail structure with ANSYS

1.4 榫头顶面盆侧、背侧的尺寸边界条件

在柱坐标系 $X''Y''$ 下 (如图 2), 榫头顶面盆侧、背侧距离参考点 $O(0, Z_5, -Z_3 - Z_4)$ 的距离分别是 L_a, L_b , 并且考虑到榫头背侧与叶背曲线 S_2 需要预留一个倒角距离, 因此确定边界条件如下式:

$$\left. \begin{aligned} L_a &= Z_5 + Z_6 - B_1/2 \\ L_b &= Z_5 + Z_6 + B_1/2 - L_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 Z_5 是参考点 O 距发动机轴距离, B_1 是榫头顶面宽度, Z_6 是发动机轴线与榫头截面中心线的距离, L_{12} 为 0.5 mm, 如图 2 所示.

1.5 叶根型线与榫头顶面的尺寸约束关系

由于榫头顶面需要包络圆弧曲线 S_1, S_2, S_3, S_4 , 因此问题的关键在于建立榫头顶面与这 4 条曲线的位置关系.

本文通过尺寸约束方法建立约束关系. 首先确立径向方向的边界条件 L_a, L_b , 从公式 (2) 可以看出 L_a, L_b 是变量 Z_5, Z_6, B_1 的函数, 因此运用 APDL (ANSYS 参数化设计语言) 编写了 $L_1, L_2, L_3, C_1, C_2, C_3$ 与 L_a, L_b 的尺寸约束关系, 见下面的程序框图 4 (以尺寸 L_2 为例).

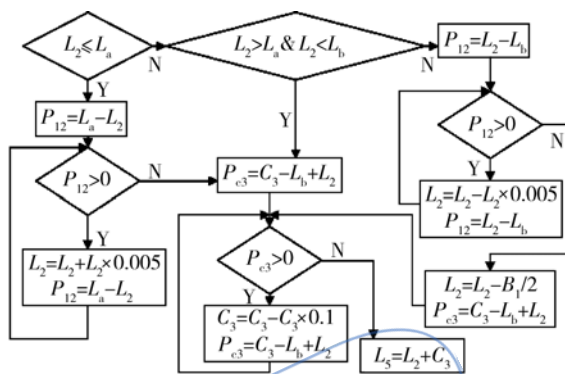


图 4 叶根型线与榫头顶面的尺寸约束关系

Fig. 4 Size constraint relations of blade profile and dovetail's top face

其次是约束榫头轴向的尺寸 Z_1, Z_2 , 本文采用的方法是通过提取圆弧曲线 S_2 的两个端点在总体笛卡尔坐标系 ZY 下 (见图 2) 的轴向尺寸 Z_7, Z_8 , 然后根据公式 (3) 即可求出榫头左端面和右端面的边界尺寸. 建模后生成的榫头顶面如图 3 所示.

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_7 + C_1/2 \\ Z_2 &= Z_8 + C_2/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

提取轴向尺寸 Z_7, Z_8 的 APDL 命令如下:

WPCSYS, -1, 0

wpoffs, 0, 0, -Z₃ - Z₄ ! 将工作平面沿 Z 轴移动到点 O₃

wpro, 90, 0.000000, ! 将坐标系绕 Z 轴旋转 90°

CSYS, 4 ! 将当前活动坐标系至为当前工作平面

Z₇ = ABS(KZ(K₂)) ! 取点 K₂ 相对于 O₃ 的 Z 轴方向距离的绝对值

Z₈ = ABS(KZ(K₁)) ! 取点 K₁ 相对于 O₃ 的 Z 轴方向距离的绝对值

其中 K₂ 是 S₂ 右端点编号, K₁ 是 S₂ 左端点编号.

1.6 榫头和叶根型线的整体变化

考虑合成弯矩的影响,在图2所示的 O_3 位置建立柱坐标系 $X'Y'$,使榫头和叶根型线绕着点 O_3 旋转,旋转角度为 F_i .考虑到榫头左端面和右端面与轮盘的相对位置关系, F_i 的变化范围有限,根据与轮盘的建模分析, F_i 的变化范围为 $(-0.3, 1.7)$.在叶片/榫头形状优化中,该变量作为设计变量,根据设计变量不应小于0的原则,对该设计变量进行转化,转化公式如下:

$$F_i = F_{i1} - 0.3 \quad (4)$$

2 叶片/榫头实体的形成

2.1 叶身实体造型

叶身实体造型首先是根据叶身数据点生成闭合、光顺的叶身截面线,继而生成叶身型面曲面,而后再生成叶身实体造型^[10].本文先通过ANSYS的APDL命令*VREAD读入叶身数据点,存储在数组中,并利用*do循环命令从数组中读取数据建立各型值点,再通过样条曲线命令(BSPIN)形成叶背、叶盆曲线,通过圆弧功能形成前缘、后缘曲线,最后通过蒙皮形成叶身曲面,继而形成整体叶身实体造型.三角过渡段实体模型是根据新设计的叶根型线与原叶身内流道的型线通过蒙皮方式建立.

2.2 榫头实体造型

在进行榫头造型时,考虑到榫头形状、榫头与叶身的相对位置关系,榫头在轮盘上的安装位置.首先根据榫头中心截面发动机轴线的相对位置(即量 Z_6)建立基准面平面,建立榫头截面图形,而后以点O为圆心(如图2所示), Z_5 (设计变量)为半径建立的圆弧为轨迹,扫掠生成榫头.然后根据榫头与轮盘的相对位置关系(即 Z_1, Z_2),切掉多余的榫头材料,得到的叶片/榫头模型如图5所示.

3 弧形燕尾型榫结构优化设计

3.1 计算模型的简化

由于叶片随着轮盘作高速旋转,对弧形燕尾型榫结构进行优化设计时要考虑榫头/榫槽接触问题的计算,计算时间长,效率低.根据经验,接触状态应介于榫头法向固定或三向固定状态.考虑计算时间,本文把叶片/榫头作为研究对象,叶片施加离心载荷和气动载荷,在榫头接触面上施加

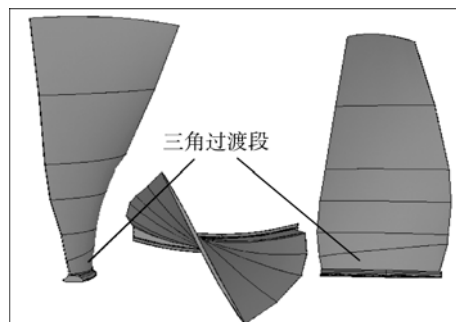


图5 叶片/榫头实体模型

Fig. 5 Model of blade and dovetail

法向约束,榫头侧面施加轴向约束^[11]进行优化计算.优化计算中考虑了叶片的设计状态、最大气动载荷状态、最小气动载荷状态等三种状态.叶片/榫头材料均为TC4合金,屈服强度为895 MPa,密度为 $4.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,叶片最大转速为11389 r/min.计算中采用20节点的Solid186单元进行模拟,共有2983个单元,节点数共有12376个,有限元模型如图6所示.

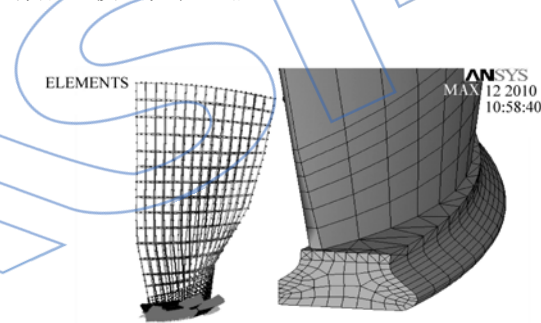


图6 叶片/榫头有限元模型

Fig. 6 Finite element model of blade and dovetail

3.2 优化模型的确定

对于叶片/榫头模型来说,决定叶根型线、榫头圆弧尺寸及顶面形状的参数有 L_1, B_1 等25个参数(如图2所示),根据设计参数之间的线性关系(公式(1),(2),(3),(4))减少不必要的设计变量,以更快速地获得最好的优化结果.因此本文选取了 X^* 参数(共13个)作为设计变量.

按照弧形燕尾榫及叶片结构设计要求,选取榫头叶背侧面喉部、叶盆侧面喉部、叶身的所有节点的最大拉伸应力和叶背侧面喉部与叶盆侧面喉部的最大拉伸应力差为应力约束条件,取叶片/榫头的质量最小为目标函数,使之最小,即优化的数学模型如下:

设计变量

$$\mathbf{X}^* = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad L_9 \quad L_{10} \quad L_{11} \quad Z_6 \quad B_1 \quad Z_5 \quad F_{11} \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T$$

目标函数

$$\min F(\mathbf{X}^*) = \min M(\mathbf{X}^*)$$

设计状态下状态变量

$$0 \leq S_{tb} \leq S_{igb_b} \quad 0 \leq S_{tp} \leq S_{igb_b}$$

$$0 \leq S_{tg} \leq S_{igb_b} \quad 0 \leq S_t \leq 0.05$$

S_{tg} 是叶身所有节点的最大第一主应力, S_{tb} , S_{tp} 分别是榫头叶背侧面喉部和叶盆侧面喉部所有节点的最大第一主应力, S_t 是为了保证叶背侧面喉部与叶盆侧面喉部所有节点应力分布均匀, 故 $S_t = (S_{tb} - S_{tp}) / S_{tb}$, S_{igb_b} 是材料的屈服强度。

3.3 原结构与新结构的结果对比

由于叶片/榫头的形状较为复杂, 要较好地描述其形状就不得不增加设计变量的数目, 这就使得计算量急剧上升。而且优化设计变量的增多, 有限元网格就变得更加庞大, 而形状优化设计过程中设计元控制节点是不断变化的, 从而很难保证有限元网格在较大范围内变动而不发生过分歪斜。因此, 要对结构进行优化设计, 就必须选择适

当数目的设计变量和优化算法。根据 ANSYS 的零阶算法, 本文采用随机搜索法和扫描法相结合^[12]进行优化。为了得到比较好的优化结果, 优化结果中综合考虑叶片在设计状态、最大气动载荷状态、最小气动载荷状态等三种状态下的应力情况, 并且在研究过程中选用不同的设计变量及网格划分方案进行多次试算, 得到的优化结果见表 1~表 3。

发动机工作时, 叶片自身质量产生的离心力对榫头喉部的应力有很大的影响。从表 1 可以看出新结构叶背处的应力为 827.11 MPa, 比原结构下降 6.51%, 新结构的叶片/榫头质量也有明显下降, 为 0.86942 kg, 比原结构下降 1.85%, 叶片设计状态下的最大应力云图如图 7、图 8 所示。

从表 1~表 3 可以看出, 叶片在上述三种状态下应力水平总体呈下降趋势, 并且叶背喉部、叶盆喉部、叶身的应力分布比较均匀, 三者之间应力梯度较小, 证明该方法设计的新结构比原结构好。

表 1 设计状态原结构与新结构结果对比

Table 1 Result contrast between new structure and original structure under design state

	m/kg	叶背喉部 S_{tb}/MPa	叶盆喉部 S_{tp}/MPa	叶身 S_{tg}/MPa
设计状态下原结构	0.885798	884.72	732.37	407.63
设计状态下新结构	0.86942	827.11	822.55	622.75
变化量/%	-1.85	-6.51	+12.31	+52.77

表 2 最大气动状态下原结构与新结构结果对比

Table 2 Result contrast between new structure and original structure under maximum aerodynamic force state

	m/kg	叶背喉部 S_{tb}/MPa	叶盆喉部 S_{tp}/MPa	叶身 S_{tg}/MPa
最大气动下原结构	0.885798	668.09	682.60	504.46
最大气动下新结构	0.86942	647.33	679.74	495.24
变化量/%	-1.85	-3.11	-0.42	-1.83

表 3 最小气动状态下原结构与新结构结果对比

Table 3 Result contrast between new structure and original structure under minimum aerodynamic force state

	m/kg	叶背喉部 S_{tb}/MPa	叶盆喉部 S_{tp}/MPa	叶身 S_{tg}/MPa
最小气动下原结构	0.885798	806.94	697.11	373.00
最小气动下新结构	0.86942	761.92	768.72	569.25
变化量/%	-1.85	-5.58	+10.27	+52.61

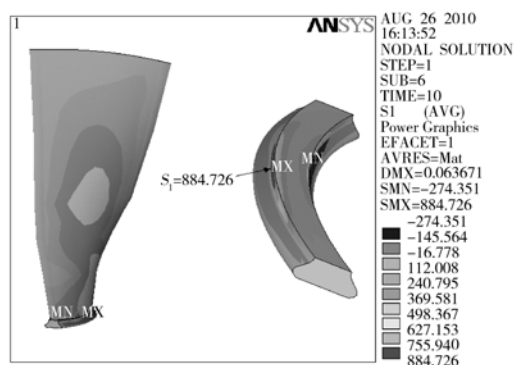


图7 原结构最大拉应力

Fig. 7 Maximum tensile stress in original structure

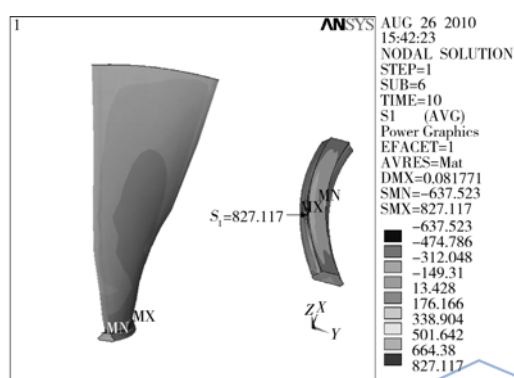


图8 新结构最大拉应力(单位:MPa)

Fig. 8 Maximum tensile stress in new structure
(unit: MPa)

4 结论

发动机叶片/榫头结构形状优化是飞机发动机设计人员关心的热点问题之一。本文的创新之处在于:

1) 针对燕尾型榫及叶片/榫头连接部位的三角过渡段开展研究,设计一种新的(燕尾型榫及叶片/榫头)叶根型线即弧形型线。

2) 在上述工作基础上,建立了叶根型线与榫头顶面的尺寸约束关系和利用 ANSYS 软件建立了叶片/榫头参数化模型,并开展榫头结构及叶根型线的优化设计,结果表明优化的叶根线形结构比原叶片/榫头结构叶根线形结构的质量更小,应力水平更低。

参考文献:

- [1] 温卫东,高德平. 榫头/榫槽接触问题边界元分析[J]. 航空动力学报,1992,7(2):117-120.
WEN Weidong, GAO Deping. Analysis for contact problems with boundary element method in tenons/mortise [J]. Journal of Aerospace Power, 1992, 7(2): 117-120. (in Chinese)
- [2] 唐国安,丁海成. 榫头-榫槽连接的盘/片结构接触问题计算[J]. 航空动力学报,1990,5(4):349-351.
TANG Guoan, DING Haicheng. Contact problems calculation for disc/blade in tenons/mortise joint[J]. Journal of Aerospace Power, 1990, 5(4): 349-351. (in Chinese)
- [3] 申秀丽,温卫东,高德平. 接触问题形状优化的边界元法及其工程应用[J]. 航空动力学报,1997,12(2):113-116.
SHEN Xiuli, WEN Weidong, GAO Deping. Shape optimization for contact problems with boundary element method[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(2): 113-116. (in Chinese)
- [4] 王迪,马利,朱金花,等. 叶片榫头接触应力的求解研究[J]. 实验力学,2004,19(4):483-487.
WANG Di, MA Li, ZHU Jinhua, et al. Study on solving contact stress on the blade rabbet[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(4): 483-487. (in Chinese)
- [5] 马刚. 压气机燕尾型榫联接结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
MA Gang. The research of the fretting fatigue life of dovetail joint in compressor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [6] 刘贵才,张栋,康德利,等. 某发动机一级压气机叶片、轮盘断裂失效分析及预防[J]. 宇航材料工艺,2000(增刊):54-57.
LIU Guicai, ZHANG Dong, KANG Deli, et al. Failure analysis and prevention for blade/disc of aero-engine[J]. Aerospace Material & Technology, 2000 (Supplement): 54-57. (in Chinese)
- [7] CUI Haitao, MA Haiquan, WEN Weidong. Reliability-based shape optimization of tenon/mortise in aero-engines with contact[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(4): 193-197.
- [8] 李立州,韩永志,王靖超. 涡轮叶片榫头特征参数化型及优化[C]//中国航空学会第六届动力年会论文集. 南京:中国航空学会动力专业分会,2006:495-498.
- [9] 刘廷毅,伊峰,张峻峰. 航空发动机圆弧形榫头型面优化设计[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(2):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(2): 288-291. (in Chinese)
- [10] 夏禹. 涡轮叶片造型 CAD 系统研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
XIA Yu. The research of the development of turbine blade modeling CAD system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [11] 王相平,徐鹤山. 有限元计算中的叶片边界条件的选取[J]. 航空发动机,1998,9(4):43-46,57.
WANG Xiangping, XU Heshan. Finite element method for the selection of blade boundary conditions[J]. Aeroengine, 1998, 9(4): 43-46, 57. (in Chinese)
- [12] 博弈创作室. 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,2004:188-190.